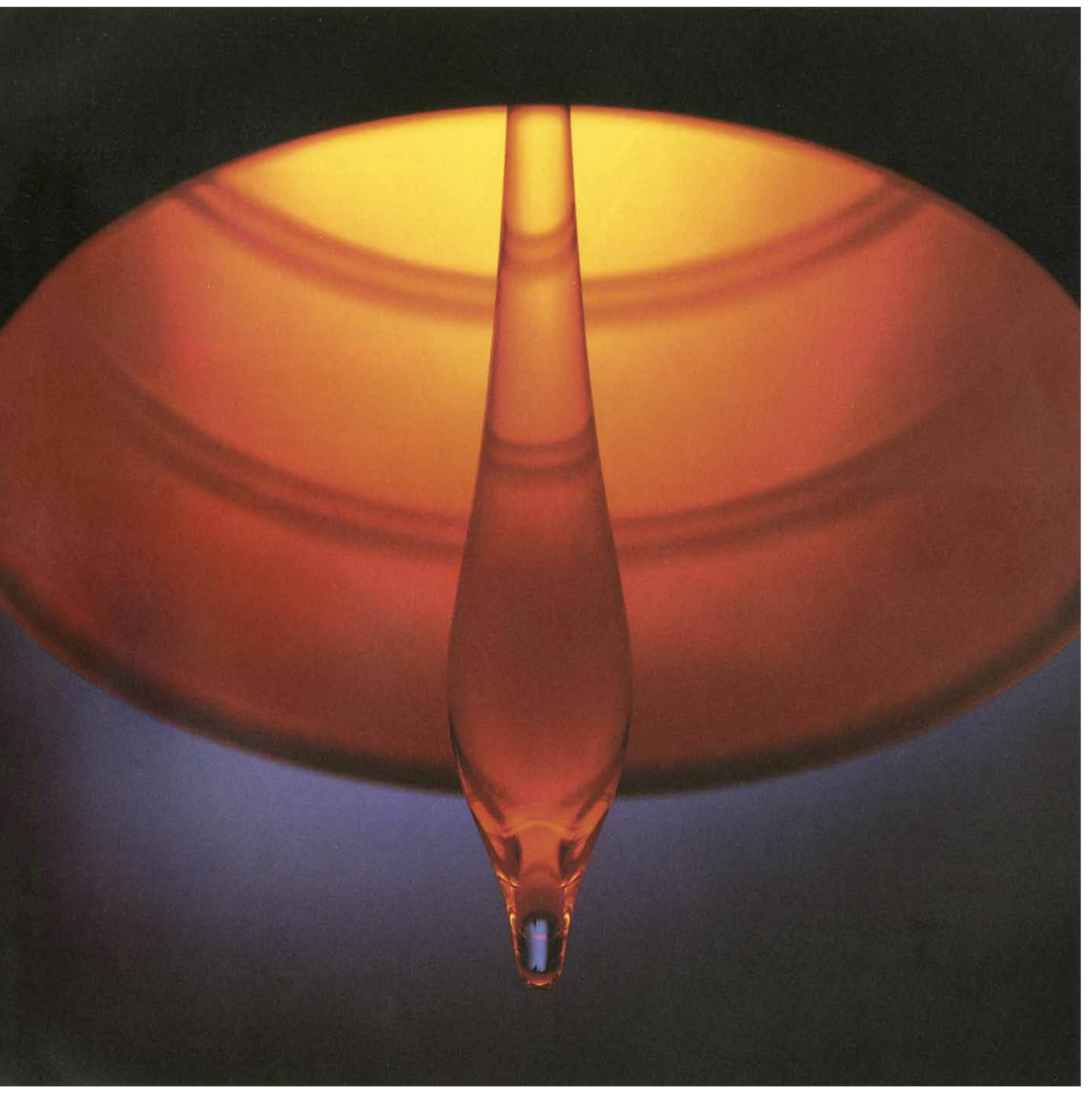
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



MATERIALES PARA EL DESARROLLO ECONOMICO

Diciembre 1986

575 Ptas.

(IVA incluido)

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 123
Diciembre 1986

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

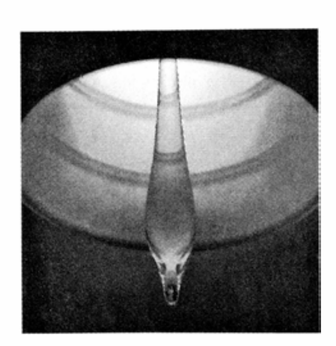
Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Antonio Salamero Salas y Jaume Valls Pasola: *Nuevos materiales y economía*; Enrique Tobías Azpitarte, F. Javier Rueda García y Diego Jesús Lao Soriano: *Materiales para la información y la comunicación*; Donato Franco Carrera: *Materiales para la navegación aeroespacial*; Manuel Bandrés Merino: *Materiales para el transporte terrestre*; Enrique Travesí de los Santos y Margarita Travesí de los Santos: *Materiales para el aprovechamiento de la energía*; Ana García García: *Materiales para la medicina*; M. Lorena Pardo Mata: *La ciencia de los materiales*; Juan-Pedro Adrados Encinas: *Materiales electrónicos y magnéticos*; Amando García Rodríguez: *Materiales fotónicos*; Pedro Molera Solà: *Nuevos metales*; Rodrigo Moreno Botella y J. Serafín Moya Corral: *Nuevas cerámicas*; Jordi Bella Romera y Sebastián Muñoz Guerra: *Nuevos polímeros*; J. Carlos Zubillaga Domínguez: *Materiales híbridos*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Libros:

Carlos Soria



LA PORTADA

La fotografía de portada simboliza el tema de este número de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA: los poderosos incentivos económicos que han fomentado el desarrollo de nuevos materiales y de las tecnologías industriales necesarias para producirlos. En la fotografía se observa la formación de una gota de vidrio fundido en el extremo de una varilla de vidrio para guías ópticas en la fábrica de la empresa Corning Glass Works, de Wilmington. A medida que la gota cae de la torre de estirado, su propio peso la estiliza, como si de un hilo de caramelo se tratara, hasta convertirla en una fibra de 0,1 mm de diámetro. La compleja tecnología necesaria para producir fibras ópticas ha nacido para satisfacer la demanda de medios con gran capacidad de transmisión de información.



Suscripciones:

Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:

España:
Un año (12 números):
4950 pesetas (IVA incluido)

Extranjero:
Un año (12 números): 35 U.S. $

Ejemplar atrasado ordinario:
450 pesetas (IVA incluido)

Ejemplar atrasado extraordinario:
575 pesetas (IVA incluido)

Distribución para España:

Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

Distribución para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:

Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
O'Donnell, 18, 4.º J - 28009 Madrid
Teléfonos 275 88 85 - 275 90 85

Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3.º, 3.ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45

Controlado
por O.J.D.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Fotografía de la portada de Shot, estudios Dark

Página	Fuente	Página	Fuente
14	James Kilkelly	96, 100	Centro de Investigación Thomas J. Watson de la IBM
16-20	Jerome Kuhl	101-104	George Retseck
21	Jon Brenneis	108	Phillip A. Harrington/ Fran Heyl Associates, cortesía de AT&T Bell Laboratories
24	AT&T Bell Laboratories	110-120	George Retseck
26-29	James Kilkelly	122	David Pearson
30-32	Johnny Johnson	123-127	Andrew Christie
34	Donald M. Curry, Centro Espacial Lyndon B. Johnson	128	Hank Iken
36-42	Hank Iken	130	Andrew Christie (*arriba*), Pratt & Whitney Aircraft (*abajo*)
50	James Kilkelly	132	Pratt & Whitney Aircraft
52-60	Andrew Christie	134	R. N. Andrews y M. R. Fletcher
62	Cary Chin, Sandia National Laboratories	136-138	George V. Kelvin
64-65	Edward Bell	139	Corning Glass Works
66-67	George V. Kelvin	140	H. Kent Bowen
68	Jon Brenneis	141	George V. Kelvin
69	George V. Kelvin	142	Garrett Turbine Engine Company
72	American Biomaterials Corporation	146	Linda C. Sawyer
74, 82	Patricia J. Wynne	148-149	Ian Worpole
75	Carbomedics, Inc. (*arriba*), Thermedics Inc. (*abajo*)	150	Ian Worpole (*arriba*), Case Center for Applied Polymer Research (*abajo*)
76	Hexcel Medical (*arriba*), John L. Ricci (*abajo*)	153	Celanese Separations Products
77	Ira Wyman, Sygma (*izquierda*), Hospital General de Massachusetts (*derecha*)	158	T. W. Chou, C. M. Kuo, S. Y. Luo y K. W. Xianyu
78	Facultad de Medicina y Odontología, Universidad de New Jersey en Picataway	160-167	Gabor Kiss
80	Vivotech	170-175	Susan E. Brennan
84	Alcoa Laboratories	177	Jearl Walker, David C. Fritts, Earth Scenes (*centro, izquierda*)
86	Museo de la Ciencia, Londres	178-181	Michael Goodman
87, 92	Ian Worpole		

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición Tecfa, S.A.
Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.

Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona

Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

JOEL P. CLARK y MERTON C. FLEMINGS ("Nuevos materiales y economía") trabajan en el departamento de ciencias e ingeniería de materiales del Instituto de Tecnología de Massachussets (MIT); Clark es profesor y, Flemings, director del departamento. A su formación en ingeniería, Clark suma su experiencia práctica en el mundo de los negocios. Se doctoró en ciencias e ingeniería de materiales por el MIT, y licenció en gestión empresarial por la Escuela Sloan. En su condición de director del laboratorio de sistemas y materiales, supervisa un programa de análisis de producción de materiales patrocinado por la industria. También Flemings ha mantenido una estrecha relación con la industria; ha colaborado con numerosas compañías, tanto en calidad de director como de consultor. Se formó en metalurgia en el MIT, licenciándose en 1954; en 1956 volvió a ese centro para integrarse en su claustro docente.

JOHN S. MAYO ("Materiales para la información y la comunicación") es vicepresidente ejecutivo de sistemas de redes de los Laboratorios AT&T Bell, donde, a lo largo de su carrera, ha desempeñado un importante papel en el desarrollo de diversas tecnologías, entre otras, el satélite TELSTAR, televideoconferencias, sónar oceánico, sistemas de conmutación digital, circuitos integrados y dispositivos fotónicos. Actualmente supervisa las investigaciones en electrónica, sistemas de conmutación y transmisión y planificación de redes. Mayo estudió la carrera de ingeniería eléctrica en la Universidad estatal de Carolina del Norte.

MORRIS A. STEINBERG ("Materiales para la navegación aeroespacial") se jubiló a finales de 1985, tras investigar 27 años en la Lockheed Corporation. En su último cargo, de vicepresidente del área científica, se ocupaba de la aplicación de nuevas tecnologías a productos comerciales. Actualmente es consultor en ingeniería aeroespacial, además de profesor adjunto de ciencia de materiales de la Universidad de California. Steinberg se licenció en ciencias por el MIT, en 1942; sirvió tres años con el empleo de capitán en las Fuerzas Aéreas de los Estados Unidos destacadas en Europa y volvió luego a Norteamérica, doctorándose en metalurgia.

W. DALE COMPTON y NORMAN A. GJOSTEIN ("Materiales para el transporte terrestre") han trabajado en la Ford Motor Company. Tras 16 años en la Ford, Compton fue nombrado miembro de número de la Academia Nacional estadounidense de Ingeniería. En la planta de Detroit, dirigió el laboratorio de ciencias físicas y químicas, cargo que compartió con el de vicepresidente de investigación. Anteriormente había enseñado física en la Universidad de Illinois, por la que se doctoró en 1955. Gjostein dirige el laboratorio de investigación de sistemas de Ford. Su asociación con la compañía se remonta a 1960, cuando se incorporó a su equipo investigador. Tras cursar ciencias en el Instituto de Tecnología de Illinois, se doctoró por la Universidad Carnegie-Mellon.

RICHARD S. CLAASSEN y LOUIS A. GIRIFALCO ("Materiales para el aprovechamiento de la energía") son, respectivamente, vicepresidente de los Laboratorios Nacionales Sandia de Livermore, California, y profesor de ciencias de materiales de la Universidad de Pennsylvania. Licenciado en física por la Universidad de Cornell en 1944, Claassen trabajó luego como ayudante de investigación en el Proyecto Manhattan en Nueva York. Se doctoró en ciencias por la Universidad de Minnesota en 1950 y poco después ingresó en los Sandia de Alburquerque; en 1982 se trasladó a Livermore. Girifalco ha enseñado en la Universidad de Pennsylvania desde 1961; asimismo ha ocupado diversos cargos administrativos, entre los que se cuentan el de vicepresidente de investigación. Se formó en física del estado sólido en la Universidad de Cincinnati, donde recibió el doctorado. Ultimamente su interés se ha centrado en la importancia económica de la energía.

ROBERT A. FULLER y JONATHAN J. ROSEN ("Materiales para la medicina") trabajan en la oficina de ciencia y tecnología de Johnson & Johnson, de la que Fuller es vicepresidente para asuntos de ciencia e ingeniería y Rosen dirige el equipo científico. Fuller, oriundo de Canadá, ha trabajado en varias divisiones nacionales e internacionales de Johnson & Johnson. Su primer empleo lo fue en la filial canadiense, donde ingresó en 1959, después de doctorarse en bioquímica por la Universidad de Minnesota. Ocupa su cargo actual desde 1981. Rosen se doctoró en ciencias de biomateriales en 1974, por la Universidad Case Western Reserve. Permaneció en esa institución dos años más, pasando después a la de Washington. Entró en Johnson & Johnson en 1979.

GERALD L. LIEDL ("La ciencia de los materiales") es profesor de ingeniería de materiales de la Universidad de Purdue y director de la Escuela de Ingeniería de Materiales. Hace 30 años comenzaba su dilatada asociación con Purdue: cursó allí los dos ciclos de carrera y en 1959 pasó a formar parte del claustro docente. Accedió a la cátedra en 1978. Los campos que centran las investigaciones de Liedl son las transformaciones de fase en sólidos, la difracción de rayos X y la microscopía electrónica.

PRAVEEN CHAUDHARI ("Materiales electrónicos y magnéticos") es vicepresidente científico de la IBM. Nacido en la India, cursó sus estudios en el Instituto de Tecnología de la India en Kharagpur, trasladándose después a los Estados Unidos para proseguir su formación en el MIT, que le recibió de doctor en ciencias en 1966. Ese mismo año entró en IBM, en el Centro de Investigación Thomas J. Watson. Ocupa su actual cargo desde 1982.

J. M. ROWELL ("Materiales fotónicos") es vicepresidente adjunto del laboratorio de investigación de ciencias y tecnología del estado sólido de Bell Communications Research (Bellcore). Nació y se educó en Inglaterra y cursó estudios en Oxford. Tras doctorarse, en 1961, se trasladó a los Estados Unidos y entró a formar parte de la plantilla del personal técnico de los Laboratorios Bell Telephone, donde permaneció hasta la división del sistema Bell en 1984. Desde entonces, escribe Rowell, "la obtención de un edificio propio para laboratorio ha constituido una de las principales preocupaciones."

BERNARD H. KEAR ("Nuevos metales") es asesor científico del Centro de Investigación de Exxon. Todos sus títulos académicos se los concedió la Universidad de Birmingham, Inglaterra. Comenzó su carrera como investigador en metalurgia en Gran Bretaña, trasladándose a los Estados Unidos en 1959, becado por el Instituto Franklin de Philadelphia. Pasó posteriormente a la división de Pratt & Whitney de la United Technologies

Corporation, donde investigó la estructura, propiedades y tratamiento de las aleaciones resistentes a las altas temperaturas. Permaneció en United Technologies 18 años, pasando a ocupar su cargo actual en 1981.

H. KENT BOWEN ("Nuevas cerámicas") es profesor de ingeniería de productos de cerámica e ingeniería eléctrica del MIT. Licenciado en 1967 por la Universidad de Utah y doctorado por el MIT, en 1970 se integró en el claustro docente de esta institución, en el departamento de ingeniería y ciencias de materiales y en el de informática. En 1976 fue nombrado catedrático. También dirige el programa de ingeniería de sistemas de fabricación y gestión del MIT.

ERIC BAER ("Nuevos polímeros") ocupa la cátedra Leonard Case de ciencias macromoleculares del Instituto Case de Tecnología de la Universidad Case Western Reserve. Nacido en Alemania, se crió en Inglaterra y cursó estudios universitarios en los Estados Unidos. Tras doctorarse en ingeniería química por la Universidad Johns Hopkins, trabajó en E. I. du Pont de Nemours & Company, Inc. En 1960 lo contrató la Universidad de Illinois, ingresando en el Instituto Case en 1962. En esa institución estableció un programa completo de ingeniería y ciencia de polímeros. En 1978 Baer fue nombrado decano del Instituto Case.

TSU–WEI CHOU, ROY L. McCULLOUGH y R. BYRON PIPES ("Materiales híbridos") enseñan en la Universidad de Delaware y pertenecen a su Centro Nacional de Investigación en Ingeniería para Materiales Compuestos. Chou cursó el primer ciclo de ciencias en la Universidad Nacional de Taiwan, el segundo en la Northwestern y se doctoró por la de Stanford. En 1969 ingresó en el claustro docente de la Universidad de Delaware, siendo nombrado profesor titular de ingeniería en 1978. McCullough estudió en la Universidad Baylor y en la de New Mexico, que le recibió de doctor en 1960. Después de trabajar en varias compañías privadas fue nombrado profesor de ingeniería química de la Universidad de Delaware, en 1971. Pipes presidía ese centro cuando se le nombró decano del Colegio Superior de ingeniería, en 1985. Defendió su tesis doctoral en la Universidad de Texas en 1972. Pasó luego a formar parte del claustro docente de la de Drexel, trasladándose a la de Delaware en 1974.

Hace...

José M.ª López Piñero

...ciento cincuenta años

Nació en Madrid el anatomista Julián Calleja Sánchez. Estudió medicina en la Universidad Central, interesándose de forma especial por las ciencias morfológicas bajo la influencia de Melchor Sánchez Toca, Rafael Martínez Molina y sobre todo gracias al magisterio de Juan Fourquet, con el que llegó a tener una auténtica relación de discípulo. Su primer cargo anatómico fue el de "ayudante disector", que obtuvo por oposición en 1856, cuando estudiaba tercer curso. Doctorado en 1860, opositó a cátedras de anatomía dos años más tarde, consiguiendo la de Granada, que no llegó a ocupar, pues fue trasladado casi inmediatamente a la de Valladolid. En dicha ciudad permaneció nueve años, comenzando allí la redacción de su *Tratado de Anatomía Humana*. El fallecimiento, en 1870, de Juan Castelló y Tagell, titular de una de las dos cátedras de anatomía de la Facultad de Madrid, le dio oportunidad de trasladarse a la Universidad Central, lo que consiguió en 1871, tras unas sonadas oposiciones en las que tuvo como principal contrincante a Aureliano Maestre de San Juan. Ocupó esta cátedra hasta octubre de 1912, fecha de su jubilación. Falleció en el mismo Madrid pocos meses más tarde (abril de 1913).

Calleja no fue en absoluto un profesor universitario consagrado a la enseñanza y menos todavía a la investigación. Por el contrario, fue un hombre muy absorbido por los cargos tanto universitarios como políticos. Otra cosa muy distinta es que desde los mismos actuara de modo beneficioso para el nivel de su disciplina, en el país y más especialmente en la Facultad de Madrid. A pesar de la opinión nada favorable que de su gestión se recoge entre sus contemporáneos, es innegable que su permanencia durante más de un cuarto de siglo en el decanato de esta última significó una notable mejora de las instalaciones y medios materiales correspondientes a las asignaturas morfológicas. El testimonio de Cajal, por ejemplo, es a este respecto terminante. Por otra parte, a su iniciativa, siendo director general, se debió en 1886 el traslado de la cátedra de histología desde el doctorado al primer curso de la licenciatura.

Como científico, su papel es bien claro dentro de la anatomía española del siglo XIX. En una primera etapa (que terminó en 1877) Calleja fue el autor del tratado que había posibilitado la labor de Fourquet. Aprovechó, por tanto, una de las pocas oportunidades que hubo en la España del siglo XIX para redactar una obra que no se redujera a una mera traducción o arreglo de libros extranjeros. Que Calleja lo dejara inacabado habla ya suficientemente de la orientación de su segunda etapa, iniciada aproximadamente con sus nombramientos de decano y de senador. Su contribución a partir de entonces quedó reducida a la publicación de sucesivas ediciones de un compendio escolar, de amplia difusión en nuestro ambiente universitario, construido con materiales extraídos del tratado inacabado y de la adaptación de obras similares extranjeras, con inclusión ocasional de datos e ideas de algunos morfólogos españoles que habían sabido permanecer más fieles a su dedicación científica.

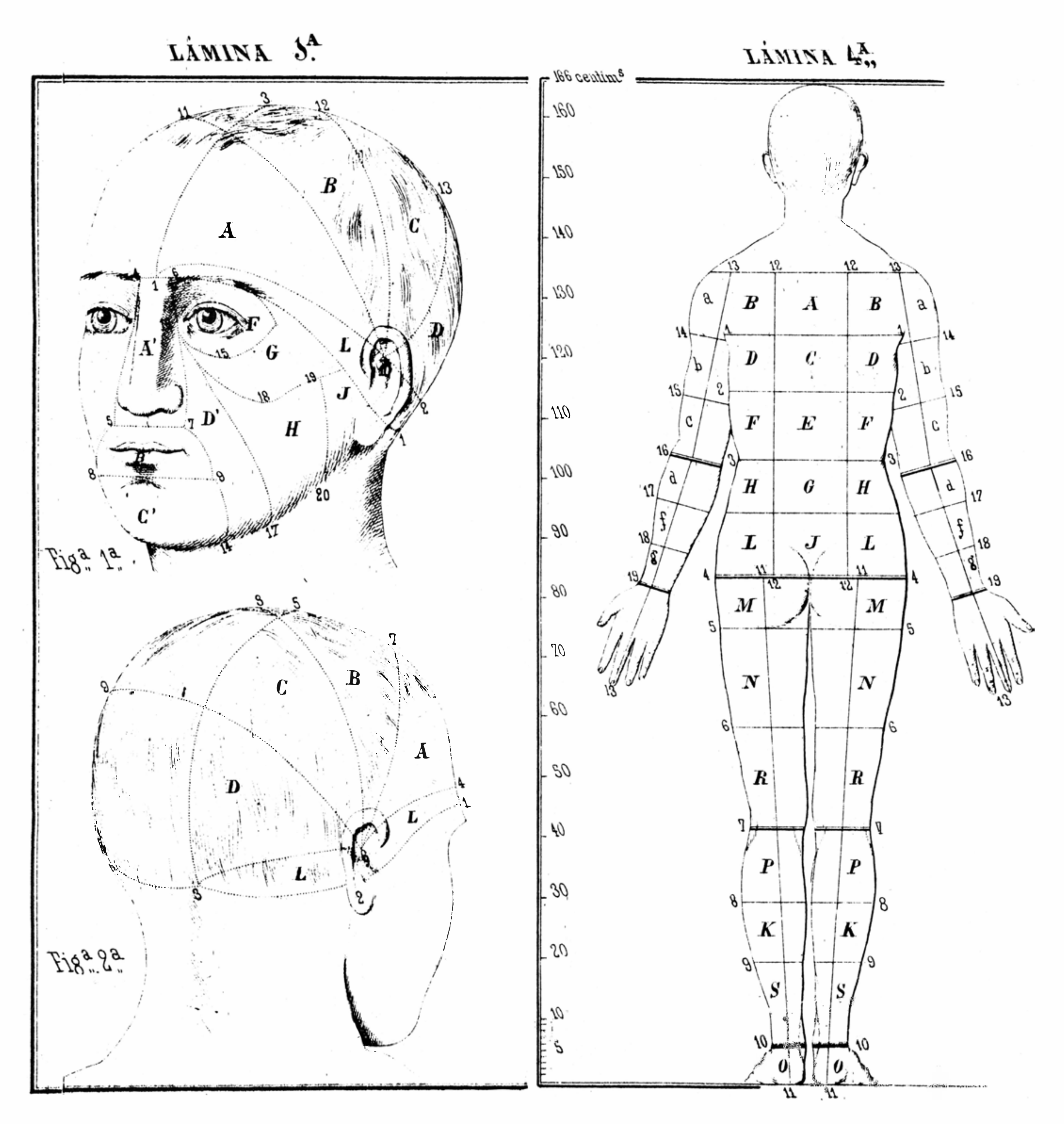
Los cuatro volúmenes del *Tratado de Anatomía Humana* que Calleja llegó a publicar aparecieron entre 1869 y 1877. Este período corresponde bastante exactamente a la primera etapa de su biografía profesional, que, como hemos dicho, está ocupada por la intención de escribir la obra que había posibilitado su maestro Fourquet. En su redacción pensaba aprovechar al máximo los textos y dibujos inéditos de éste, lo que cumplió efectivamente, reproduciendo los que dejó terminados y aprovechando los materiales existentes en sus apuntes.

El plan primitivo de la obra incluía siete volúmenes: el primero, consagrado a generalidades o "prolegómenos", y los seis restantes a la estequiología, miología, angiología, neurología, estesiología y aponeurología, respectivamente. Durante sus años de estancia en Valladolid redactó Calleja los tres primeros: el volumen de "prolegómenos" apareció en 1869; el de "esqueletología", en 1870, y el de miología, en 1872, ya durante su primer curso de catedrático en Madrid.

Los "Prolegómenos de Anatomía humana" consisten en una exposición desusadamente extensa —casi trescientas páginas— de las generalidades que los mejores tratados anatómicos suelen resumir en un breve espacio. A tan considerable extensión contribuye notablemente la reproducción completa de tres discursos de Fourquet en los que se encomia de forma puramente retórica la importancia de la anatomía humana, y de otros tres de mayor interés científico en los que expone sus ideas acerca del plan descriptivo, la composición del organismo y la cuadrícula topográfica. No obstante, el principal responsable de la longitud es el estilo difuso y reiterativo del propio Calleja. El contenido de este volumen, dejando aparte las cuestiones meramente introductorias, puede agruparse bajo cuatro epígrafes. El primero se ocupa de la composición y estructura del cuerpo humano. El segundo, de los métodos anatómicos. El tercero, de la forma de exponer los datos morfológicos; es decir, de lo que ahora llamamos con Laín Entralgo "estilo anatómico". El cuarto y último es una consideración general del cuerpo humano en su conjunto, que Calleja considera previa a la particularizada o analítica que ocupará el resto de los volúmenes.

El segundo volumen del *Tratado*, la "esqueletología", contiene la exposición de los huesos y las articulaciones. La parte que tienen en él los apuntes de Fourquet es mucho más pequeña que en los "Prolegómenos", debido a que "los trabajos de mi eminente maestro no se refieren al esqueleto". La fuente fundamental, según declaración del mismo Calleja, fue, en la anatomía descriptiva, "las observaciones que he practicado por mí mismo". En lo que respecta a la anatomía comparada, en cambio, "confieso francamente que no he podido seguir el mismo procedimiento: por el contrario, las obras notabilísimas de Cuvier, Carus y Milne Edwards han sido las guías que me dirigieron".

Semejante procedencia se afirma del

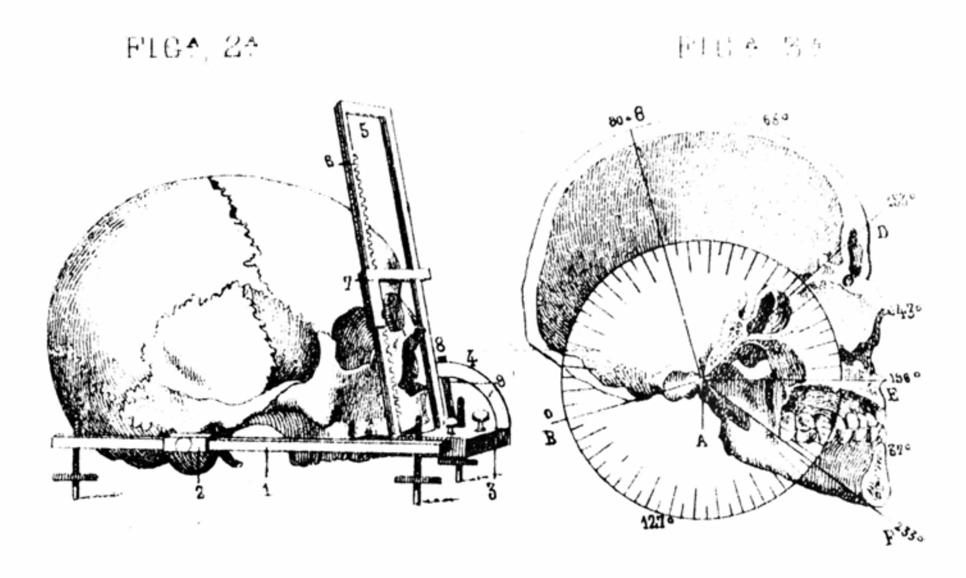


1. Láminas del Tratado de Anatomía Humana *(1869-1877), de Julián Calleja. Ambas corresponden a los trabajos sobre la cuadrícula topográfica de su maestro Juan Fourquet y están basadas en sus dibujos*

contenido del tercer volumen, consagrado a la "miología". En los ejemplos de anomalías musculares recogidos por Fourquet, por el propio Calleja y por otros anatomistas españoles, cifra su autor el máximo "rasgo de originalidad".

La "Angiología", cuarto y último volumen publicado, se dedica a la exposición en cinco secciones del corazón, las arterias, los capilares y los linfáticos. Tras subrayar de nuevo el papel fundamental desempeñado por la observación personal en su redacción, Calleja vuelve a destacar en primera línea el material contenido en los apuntes de su maestro: "He podido enriquecer el resultado de mis estudios con datos importantísimos que fueron recogidos por mi eminente maestro el doctor Fourquet."

El *Tratado* de Calleja significa quizás el máximo esfuerzo de la España del siglo XIX en el campo de la iconografía anatómica. La carencia de ilustraciones —o a lo sumo, la mera reimpresión de grabados extranjeros— es una constante incluso en los mejores compendios españoles de esta centuria. Las únicas excepciones a esta regla son el *Atlas* que se publicó a finales de siglo bajo la dirección de Mariano Batllés y la nutrida serie de láminas que acom-



2. Grabados del Tratado *de Calleja que reflejan su interés por la antropología física. Representan el goniómetro facial de Jacquart y el procedimiento de Segond para medir las áreas del cráneo y de la cara*

pañan los cuatro volúmenes del *Tratado* de Calleja. Los "Prolegómenos" llevan únicamente cinco, dedicadas por entero a la cuadrícula topográfica de Fourquet; la "Esqueletología", cincuenta y una; la "Miología" y la "Angiología", veintitrés y veinte, respectivamente. Únicamente cinco de dichas ilustraciones están sacadas de otras obras: tres, de anatomía microscópica de los tejidos óseo, cartilaginoso, fibroso y muscular, tomadas de los trabajos de Morel; una, con "cabezas frenológicas", original de Cubí y Soler, y otra, de anatomía muscular artística, procedente del tratado de Fau. El resto, nos dice Calleja, "han sido copiadas en gran parte de objetos naturales, aprovechando, no obstante, para su corrección muchas de las iconografías ya publicadas".

Lugar aparte merecen las cinco láminas dedicadas a la cuadrícula topográfica, de las cuales tres proceden íntegramente de los apuntes de Fourquet, siendo las otras dos reconstrucciones de sus ideas con mayor o menor participación de Calleja. Las cincuenta y seis láminas de los dos primeros volúmenes las grabó en Valladolid Gervasio Fournier; las seis primeras de la "Miología" las realizó en Madrid un tal F. González; su bajísima calidad movió sin duda a Calleja a cambiar de grabador, de forma que las treinta y siete restantes fueron obra del artista madrileño Federico Kraus.

Poco hay que decir de los datos referentes a la anatomía descriptiva contenidos en el *Tratado* de Calleja. La madurez casi definitiva alcanzada en este terreno por la morfología de la primera mitad del siglo XIX no dejaba margen alguno de importancia a la originalidad. Calleja no hace, pues, sino reproducir el nivel medio de la disciplina, aunque en su exposición se trasluce la frecuencia con que había comprobado directamente en la sala de disección las descripciones de los libros. Ello se refleja, por ejemplo, en la nutrida serie de variantes y anomalías recogidas personalmente, que va anotando sistemáticamente en los correspondientes apartados.

De forma más vigorosa todavía se desprende esta misma impresión de las notas, materiales e incluso términos que, procedentes de los textos de Fourquet, salpican constantemente su exposición. Es inconfundible en ellos el tono de quien ha tenido un prolongado y profundo contacto con la realidad y puede tomar ante cada detalle de la misma actitudes propias. El contraste de esta viveza que se desprende del trabajo de Fourquet con la impersonal sequedad de los compendios españoles habituales en esta centuria decimonónica es rotundo. Los frutos objetivos de su obra no podían ser, sin embargo, de importancia.

Es bien visible la magnitud de su esfuerzo y la profundidad de sus conocimientos en cuestiones como su cuadrícula topográfica o su clasificación de las articulaciones, pero los hallazgos que se le deben se reducen en el mejor de los casos a meros detalles secundarios, variantes y anomalías, principalmente de músculos, arterias y venas. El único dato original de algún relieve sería la descripción del músculo estilo-auricular, que Calleja informa exponía en sus explicaciones desde 1854, y que propone llamar "músculo estilo-auricular de Fourquet". Así viene repitiéndose desde el estudio de Escribano por todos los que han tomado de este autor la historia de la anatomía española del siglo XIX. Pero este manojito muscular —en realidad variante excepcional— que Calleja creía descrito por Hyrtl con posterioridad a la citada fecha, había sido estudiado y bautizado por el gran morfólogo vienés en un trabajo publicado en 1840, con lo que el papel de Fourquet queda reducido a una descripción posterior, independiente sin duda del conocimiento de este trabajo.

Los datos histológicos ocupan un lugar muy poco brillante en el *Tratado* de Calleja. En el volumen de "Prolegómenos" dedica dos breves epígrafes a la exposición general de la estructura íntima del organismo humano. En ellos acepta un punto de vista titubeante, que sigue atendiendo, en realidad, únicamente a los tejidos, pero aceptando que éstos a su vez están compuestos por los "elementos anatómicos", que "representan el último grado de la forma orgánica". Detrás de esa poco comprometedora denominación de "elementos anatómicos" no se encuentra la teoría celular, sino de forma muy inmadura y parcial.

Algo superior al contenido histológico del *Tratado* de Calleja es la parte consagrada a la embriología. En el artículo que le dedica en el volumen de generalidades comienza por dar noticia de la doctrina preformacionista o "de las preexistencias orgánicas", que considera superada y "apoyada sobre hipótesis y no en la observación atenta de los hechos". La teoría aceptable es, por supuesto, la epigénesis, "demostrada con experimentos y con el más severo razonamiento". Su exposición, sin embargo, no se apoya en von Baer, sino en el morfólogo francés Serres, al que llama "genio anatómico" y considera como principal formulador de las nuevas teorías epigenéticas. Resumiendo sus trabajos, Calleja describe la formación del embrión y de sus cubiertas, y da después brevísimas noticias del desarrollo de las principales partes anatómicas.

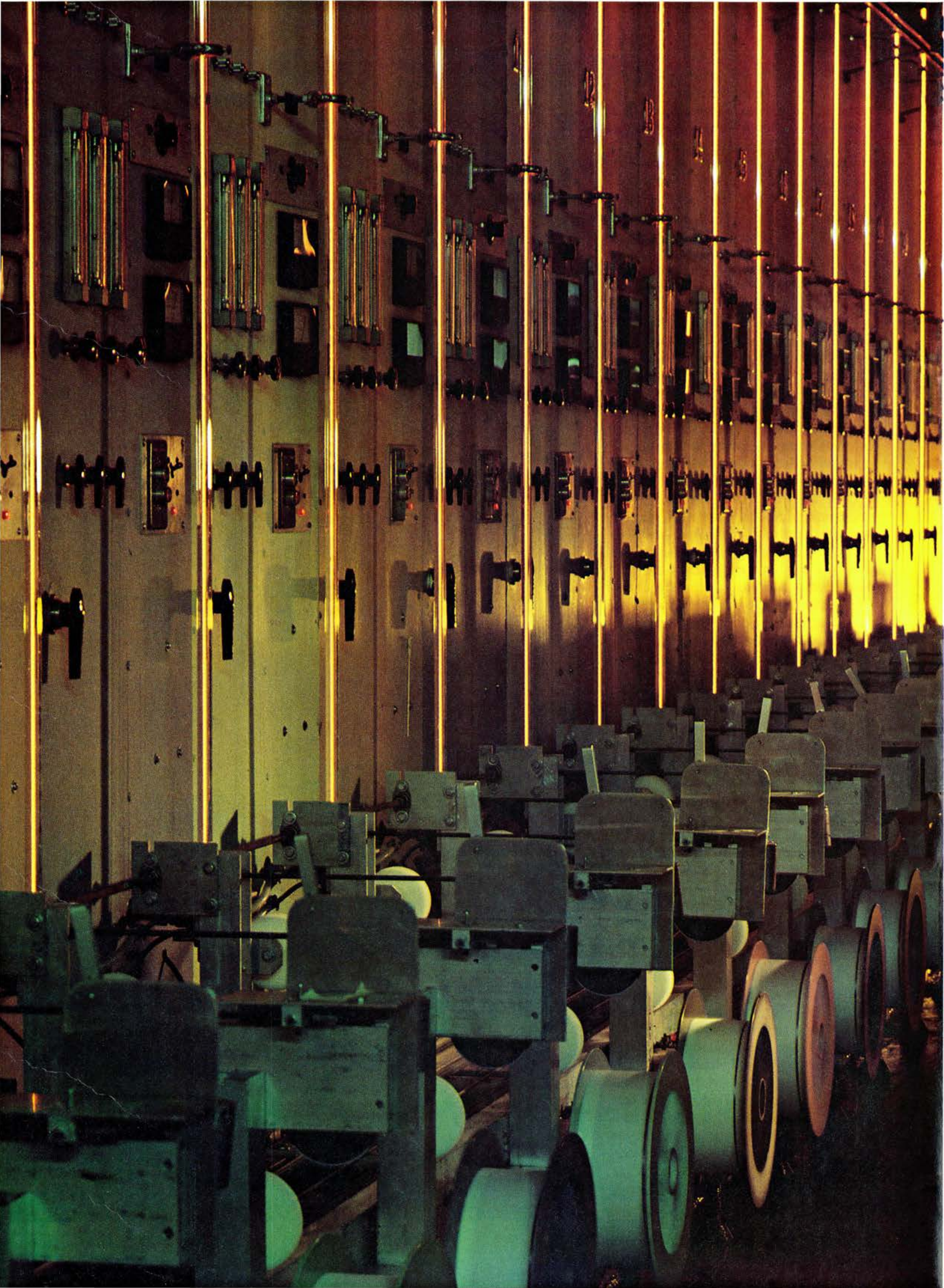
Una relativa novedad de la inconclusa obra del anatomista madrileño es la anatomía comparada. En ella se inicia, en efecto, la información sistemática correspondiente a esta disciplina dentro de la enseñanza anatómica española. En el volumen primero, Ca-

lleja dedica un artículo a la "escala de complicación de los vegetales y animales", cuestión que resume desde supuestos implícitamente idealistas. Pero lo importante son los amplios epígrafes de anatomía comparada que incluye en el estudio de las diferentes partes orgánicas.

Ya hemos dicho que advierte que este tipo de datos no ha podido verificarlos personalmente como los de la anatomía descriptiva, sino que, "por el contrario, las obras notabilísimas de Cuvier, de Carus y de Milne Edwards han sido guías que me dirigieron". La síntesis que Calleja ofrece de las mismas es competente y de notable amplitud. El avance que su *Tratado* significó en este terreno, dentro del pobre panorama científico español, sólo puede medirse conociendo la ausencia casi completa de noticias de los brillantes estudios comparados de la Europa romántica en las publicaciones españolas anteriores.

Otro mérito indiscutible de la obra que comentamos es la atención que dedica a la antropología física, disciplina que por entonces comenzaba a constituirse en una esfera científica con personalidad autónoma. La fuente de información de Calleja a este respecto es, sin duda, la anterior a este primer momento de madurez, pero no puede regateársele la amplitud de criterio que significa incluir información objetiva acerca de problemas como las razas humanas, la modificación que experimenta la organización por los factores ambientales y la "distribución del género humano por el globo".

Con todas sus limitaciones, el *Tratado* de Calleja significó, pues, un avance considerable dentro del saber anatómico de la España decimonónica. Este avance es el que había posibilitado la generación anterior, y muy en primera línea Fourquet, con la recuperación de los hábitos de trabajo científico. Durante la primera etapa de su vida profesional, Calleja supo servir esta posibilidad. Cabía esperar de un hombre que publicaba esta obra a los treinta y tantos años una seria contribución posterior, cuando alcanzase una información realmente al día e iniciase una labor de investigación creadora. La interrupción del mismo *Tratado* expresa claramente la falta de continuidad del esfuerzo del anatomista madrileño. Su dilución en los cargos universitarios y políticos redujo el resto de su producción científica a algo mucho más modesto: la redacción de las sucesivas ediciones de su *Compendio*.



Nuevos materiales y economía

Los avances en la ciencia e ingeniería de materiales estimulan el crecimiento de muchos sectores de la economía. Los nuevos materiales y procesos, amén de satisfacer las necesidades de las industrias existentes, crean nuevas tecnologías

Joel P. Clark y Merton C. Flemings

Estamos asistiendo a una drástica transformación de las relaciones entre el hombre y los materiales, de la que derivarán probablemente consecuencias económicas de profundas repercusiones. A lo largo de la historia, el hombre ha adaptado toda clase de materiales: piedras, madera, arcillas, fibras vegetals y tejido animal. La fundición de metales y la producción de vidrio supusieron un refinamiento de esa relación. Pero sólo en los últimos años, gracias a los avances en la comprensión teórica de la estructura física y biológica de la materia, así como a los progresos en las técnicas experimentales e industriales, ha sido posible acotar qué necesidades tenemos, para empezar a desarrollar, átomo por átomo, el material que las satisfaga.

Este número de *Investigación y Ciencia* explora el nuevo campo de la ciencia e ingeniería de los materiales y enmarca las relaciones entre éstos y la sociedad. Los artículos se agrupan en dos grandes bloques. El primero grupo trata sobre la demanda y otras consideraciones de política económica que configuran las necesidades de materiales de las industrias occidentales. El segundo grupo presenta panorámicas generales de los principales dominios de la ciencia e ingeniería de los materiales, analiza la capacidad de los investigaciones para cubrir las necesidades señaladas en los primeros artículos y esboza los próximos pasos que habrán de darse en este segmento de la investigación.

De ambos grupos de artículos se desprende una idea dominante: además de satisfacer ciertas necesidades, la ciencia e ingeniería de los materiales crea nuevas oportunidades y abre a la sociedad caminos insospechados para afrontar el problema de la escasez de los recursos y los relativos al sostenimiento del crecimiento económico y creación de capital. La productividad y la estructura de las fuerzas del trabajo quedan también profundamente afectadas por los avances en este campo. Para los responsables de la industria, las finanzas y la política, la definición y puesta en práctica de estrategias que aprovechen las oportunidades creadas por la ciencia de los materiales constituye un importante reto al que deberán hacer frente en este último cuarto de siglo.

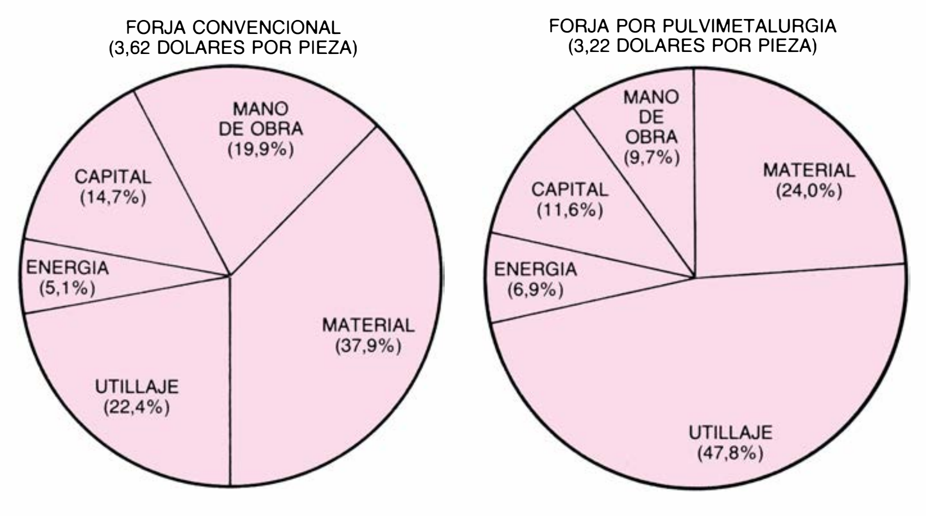
Los avances en la ciencia e ingeniería de los materiales han encontrado una rápida resonancia en la economía. En los Estados Unidos, por cada persona deben obtenerse y procesarse en promedio unos 9000 kilogramos anuales de recursos no energéticos ni recuperables. Las industrias dedicadas a la producción directa de materiales de primera necesidad dan empleo a un millón y medio de personas, cerca del 1,5 por ciento de la población activa; de cada empleado en esas industrias depende el puesto de trabajo de dos o tres en otros sectores.

El valor de la producción de nuevos materiales asciende ya a unos nueve billones de pesetas, lo que supone alrededor del 14 por ciento del valor de la producción total de materiales. El trabajo de aquéllos ocupa a cerca del 10 por ciento de la fuerza laboral empleada en la industria de materiales. No sólo se influye en la bolsa del trabajo; el efecto indirecto de esos materiales en el resto de la economía es, también, muy importante. Y ello porque los materiales avanzados no constituyen un producto final, sino que forman parte de componentes cuyo funcionamiento correcto resulta decisivo para asegurar las máximas prestaciones en sistemas de gran complejidad: aviones y vehículos espaciales, instrumentos electrónicos y automóviles. Los nuevos materiales resultan esenciales para el futuro crecimiento de estas y otras industrias. De hecho, el progreso de la ciencia de los materiales impone los límites en el ritmo de crecimiento de los sectores clave de la economía.

Tomemos un ejemplo. Para que la industria de los ordenadores mantenga el ritmo de desarrollo de su capacidad de tratamiento de la información, deberá superar importantes restricciones físicas. Mas allá del límite teórico de los 100 millones de elementos por pastilla ("chip") de memoria, la tecnología deberá explotar ciertos efectos cuánticos que sólo afectan a un puñado de partículas; o tendrá incluso que seguir modelos biológicos. La demanda de una capacidad de transmisión de información, cada vez mayor, mueve al desarrollo de vidrios de extremada pureza y otros materiales para generar y transmitir haces de luz.

En aviones y cohetes, la reducción de peso en la estructura significa poder aumentar la carga útil (ya sean pasajeros, instrumentos científicos u ojivas nucleares), así como ahorro de combustible. A fin de conseguir las velocidades previstas para el Orient Express, un avión de Mach 8 que volará de Nueva York a Tokyo en tres horas, habrán de crearse materiales que resistan temperaturas de hasta 1800 grados centígrados. Puesto que los motores aprovechan mejor el combustible cuanto más alta es su temperatura de trabajo, la obtención de paletas de turbina y otros componentes que resistan esas condiciones exigirá el desarrollo de materiales híbridos y de nuevas aleacio-

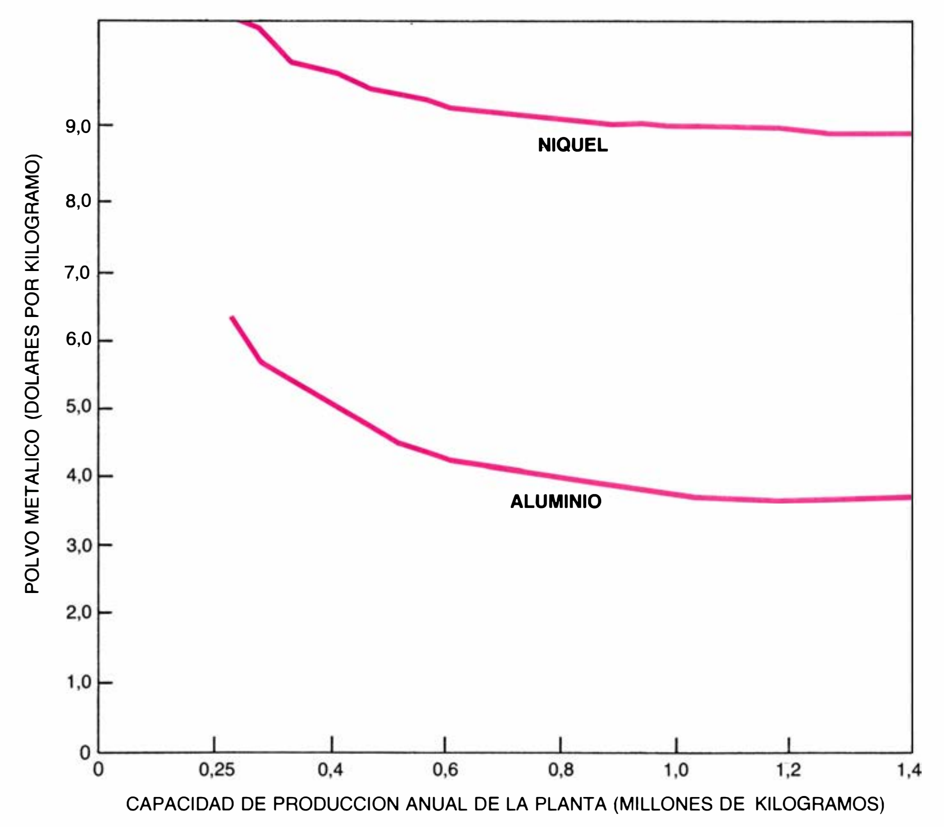
1. MONOFILAMENTOS DE BORO–TUNGSTENO que se devanan sin solución de continuidad de los tubos de vidrio, donde se forman por deposición de vapores químicos. Las fibras constituyen un refuerzo de gran resistencia y rigidez en ciertos híbridos, una clase de materiales que está transformando la industria de la automoción y la aeroespacial. El monofilamento es un alambre de tungsteno revestido de boro. Se calienta el tungsteno eléctricamente hasta la incandescencia mientras va atravesando unos tubos de vidrio llenos de tricloruro de boro en estado gaseoso. El gas se escinde, deponiéndose boro en el alambre de tungsteno. Esta planta pertenece a la empresa que ha desarrollado el proceso: Textron Inc., en Lowell, Mass.



2. COMPETENCIA ENTRE PROCESAMIENTOS de los materiales; pugna que puede influir en su utilización tanto como la competencia entre los propios materiales. Los gráficos muestran el desglose de los costes de producción de bielas de automóvil por el método de forja convencional y por un nuevo procedimiento, la forja por pulvimetalurgia. El molde necesario para la metalurgia de polvo es más caro que el utillaje para la forja convencional, pero el nuevo método requiere menos mano de obra y confiere a la biela un mejor acabado; en la fabricación se pierde menos material. Todo lo cual abarata el proceso seguido.

nes. En la industria del automóvil, el ahorro de combustible obliga a recurrir a plásticos de alta resistencia, en la construcción de carrocerías, y a los componentes cerámicos para los motores. Se ha comprobado que algunos nuevos materiales, desarrollados en principio para otras aplicaciones, son de gran ayuda para remediar las lesiones infringidas en el cuerpo humano.

Casi todos los equipos militares se fabrican con aleaciones (de hierro o de otros metales), cerámicas, plásticos y materiales híbridos. Es más, industrias vitales para la dotación, transporte y apoyo logístico de las fuerzas armadas conceden especial importancia al aprovechamiento de las propiedades de los nuevos materiales que multiplican el rendimiento de los equipos.



3. COSTE de los materiales metálicos pulverulentos por solidificación rápida; podría reducirse si aumentara la producción de las plantas industriales. Las curvas muestran el descenso esperado para el caso de los polvos de níquel y aluminio obtenidos por solidificación rápida. El crecimiento de la demanda de esos materiales en polvo podría venir instado por la industria aérea, pues el aluminio de solidificación rápida puede emplearse en las estructuras de los aviones y, el níquel obtenido por el mismo proceso, en los motores a reacción.

La ciencia de los materiales constituye un elemento crucial en la resolución de problemas económicos fundamentales, entendiendo por tales la limitación de recursos, la escasez de materiales estratégicos, el sostenimiento del crecimiento económico y la productividad, la creación de capital y la competividad en el mercado. El cobre es un claro ejemplo del primer aspecto. La continua demanda de este metal básico ha motivado la explotación de yacimientos de muy baja riqueza, cuyo suministro hay que completar con la recuperación y el reciclaje. La primacía del cobre como conductor está cayendo frente a otros metales, así el aluminio; también se están desarrollando polímeros eléctricamente activos. En las comunicaciones, el empleo del cobre ha pasado a la historia; las fibras ópticas han ocupado su lugar.

Las últimas previsiones sobre la escasez de energía, resaltadas apelando a la conciencia ciudadana a propósito del agotamiento de las reservas de petróleo, buscan la solución del problema en tecnologías basadas en la fisión nuclear, la fusión nuclear y la energía solar, todas ellas dependientes de nuevos materiales. Las aleaciones superconductoras y los productos pulvimetalúrgicos reducirán drásticamente, o eliminarán, las pérdidas por transmisión.

Los materiales presentan similares expectativas en el campo de los minerales imprescindibles: manganeso, cromo, cobalto y el grupo de metales del platino, que actualmente Occidente debe importar. Científicos e ingenieros están desarrollando nuevas aleaciones metálicas y métodos de fabricación, así como cerámicas polímeros y materiales híbridos con poca o nula dependencia de materiales importados y que frecuentemente permiten obtener productos más eficaces o más rentables. Las nuevas cerámicas destacan a este respecto. La producción de cerámicas estructurales se apoya en refinados procesos cuyo coste y fiabilidad son inciertos; ello no obstante, con la solución de esos problemas se reduciría considerablemente la dependencia del cobalto y del tungsteno en las aplicaciones de tallado y resistencia al calor, y la dependencia del cromo, cobalto, manganeso y metales del grupo del platino en su empleo por el sector del automóvil.

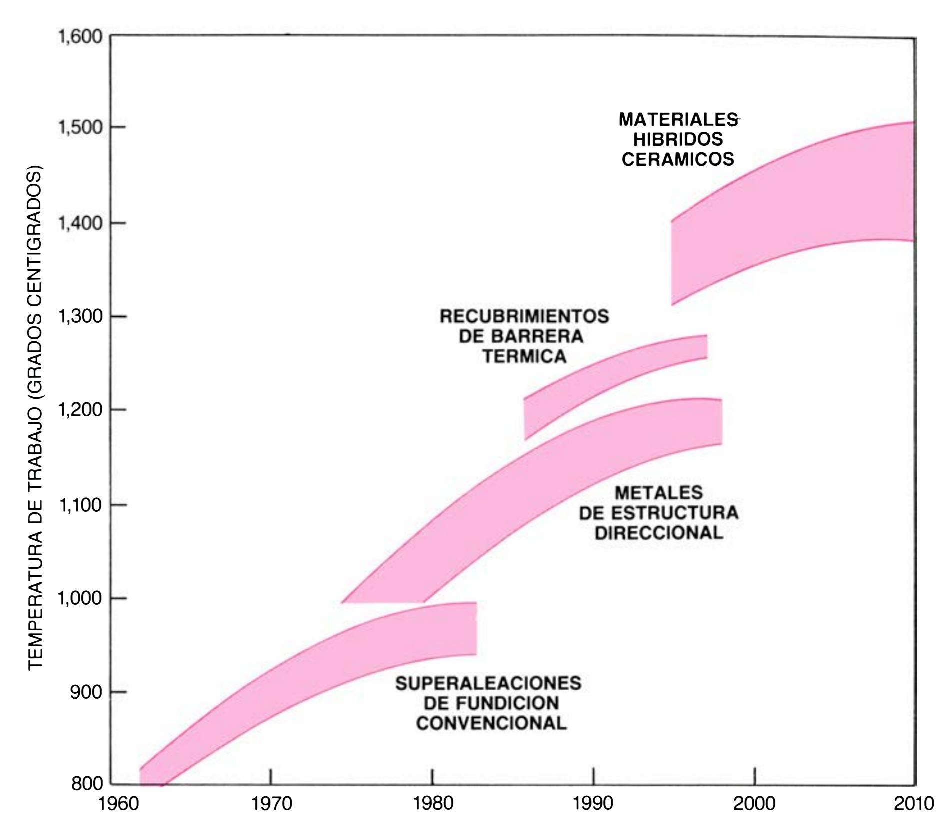
En ningún otro campo resulta tan esencial el papel de los nuevos materiales como en la estrategia que permita abordar con éxito la competencia en el mercado, la productividad y la inversión rentable del capital. Sector es-

pecialmente significativo en el que esa interrelación llega a sus últimas consecuencias es la industria del automóvil. Los fabricantes se enfrentan a una progresiva internacionalización del mercado y al crecimiento de la competencia. El precio y la capacidad de ofrecer una amplia gama de modelos constituyen dos requisitos importantes del mercado, que obligan a que los procesos de fabricación resulten, a la vez, económicos y versátiles. Deben producirse muchos modelos distintos a partir de unas pocas líneas de montaje en pequeñas cantidades y con unos costes que permitan ofrecerlos a precios competitivos.

Para vencer en ese reto, los fabricantes han empezado a adoptar la estrategia de inventario *Kanban* ("justo a tiempo"), líneas de montaje altamente automatizadas y diseño asistido por ordenador. Los nuevos materiales desempeñan también aquí un papel decisivo, pues ayudan a los fabricantes a dar respuesta a los problemas de precio y a flexibilizar la producción, con una mejora general de las prestaciones.

Por ejemplo, un conjunto de moldes de guardabarros de chapa de acero cuesta alrededor de 2 millones de dólares, mientras que el utillaje para producir en plástico el mismo componente vale 250.000 dólares. Para la producción de grandes series, digamos 2,5 millones de guardabarros en cinco años, resulta más económico el utillaje de acero, porque las herramientas de plástico no aguantarían series tan largas y habría que reponerlas. Sin embargo, para un menor volumen de producción como el que favorecen las condiciones y las estrategias actuales del mercado, el material plástico se convierte en el más atractivo.

Las planchas de la carrocería, al igual que los parachoques, se preparan fácilmente con materiales poliméricos. Los "tres grandes" de la industria norteamericana del automóvil están ensayando la eficacia y el grado de aceptación de esas dos aplicaciones. Ford ofrece un parachoques de plástico en determinados modelos de su serie Escort y la General Motors tiene dos series con los módulos de la carrocería de plástico –el Corvette y el Pontiac Fiero. Ese cambio hacia los automóviles de plástico conlleva unas implicaciones cuantificables. La densidad del acero es de unos 7,8 gramos por centímetro cúbico, mientras que, en promedio, el plástico pesa sólo 1,2 gramos por centímetro cúbico. La utilización de materiales más ligeros reducirá el consumo. No acaban ahí las ventajas. Los plásticos no se oxidan y son más resistentes a los pequeños accidentes, prolongando la vida media del automóvil.



4. ELEVACION DE LA TEMPERATURA DE TRABAJO en los motores a reacción (medida a la entrada de la turbina), que se logrará si se construyen las paletas de las turbinas con nuevos materiales. La banda inferior del gráfico indica el incremento de temperatura conseguido hasta el momento con las mejoras llevadas a cabo en las superaleaciones de níquel, el material típico de las turbinas. En las próximas décadas, la fabricación de paletas de turbina con materiales reforzados con estructuras cristalinas direccionales, paletas protegidas con revestimientos cerámicos o aleaciones especiales y, en último término, materiales híbridos de matriz cerámica permitirán elevar las temperaturas de entrada en la turbina. A altas temperaturas, los motores rinden mucho más, consumen combustibles de menor calidad y generan más empuje.

Desde 1974, el peso medio de los automóviles de fabricación norteamericana ha descendido un 15 por ciento, aproximadamente unos 250 kilogramos. Y ello, en su mayor parte, a expensas del acero al carbono y del hierro colado. Curiosamente, aunque se prevé una disminución en peso del 27 por ciento en los automóviles fabricados en 1992, el acero mantendrá su porcentaje en el peso del vehículo en la cuantía de 1974. La respuesta a esa paradoja descansa en el uso de nuevas aleaciones de acero de alta resistencia que pueden fabricarse con productos más ligeros que el acero al carbono. A la vez, el empleo del aluminio ha crecido un 50 por ciento desde 1975, hasta llegar a un promedio de 60 kilogramos por automóvil, que probablemente sean algunos más en 1992.

La sustitución del acero al carbono por aleaciones ligeras de alta resistencia beneficia al cliente y al fabricante. En lo que dure la vida del coche se ahorrarán algo más de ocho litros de gasolina por cada kilogramo de acero al carbono sustituido por nuevos aceros. En consecuencia, los 135 kilogramos de aleaciones ligeras de alta resistencia de 1986 comportarán un ahorro aproximado de 1000 litros de gasolina a lo largo de la vida media del automóvil. El uso de aluminio ahorra unos 2 litros por kilogramo de metal, es decir, cerca de 600 litros en la vida del coche.

Resultan obvias las ventajas que esos materiales de altas prestaciones comportan al consumidor. Quizá lo más sorprendente sea que, al menos en este caso, esos materiales aumentan también los ingresos del fabricante. Los aceros de alta resistencia se venden hoy a tarifas un 20 por ciento superiores a las de los aceros al carbono, y el aluminio es un 150 por ciento más caro; aun así son rentables, pues se compensan de largo con la reducción de peso. Contrariamente a lo que suele creerse, los plásticos usados en la industria son también bastante caros. Un kilogramo de teflón cuesta 6000 pesetas y el vespel, un plástico para altas temperaturas que fabrica Du Pont, se cotiza a unas 800.000 pesetas el kilogramo. Estos ejemplos muestran las tendencias principales de una industria que ha evolucionado de tal modo que la demanda de materiales estructurales como el acero ha alcanzado su techo y se des-

tina, en su mayor parte, a piezas de recambio.

A la hora de decidir sobre las ventajas de un determinado material frente a otro, podemos apoyarnos en criterios cuantitativos bastante precisos. En el laboratorio de materiales del Instituto de Tecnología de Massachusetts, uno de los autores (Clark) aplicó dos enfoques metodológicos a problemas relacionados con la industria de materiales. La así llamada técnica de análisis multiatributivo de utilidad permite estimar el valor de las características de un material en una aplicación específica. La segunda técnica, el análisis del coste del proceso, es una simulación informática de lo que importa la producción de componentes usando materiales y procesos tecnológicos distintos. Basándose en esos modelos, el analista define las consecuencias, en términos de su coste, que conlleva un conjunto de supuestos y describe la sensibilidad del coste a los cambios de los rendimientos del proceso y los volúmenes de producción, entre otras variables.

El ingeniero utilizará la primera técnica para seleccionar, de entre una serie de opciones, el material para un parachoques y el proceso de fabricación, sabiendo que todas las posibilidades satisfacen una normativa técnica, como pueden ser las leyes sobre seguridad de vehículos a motor a propósito de los impactos en parachoques. Las opciones podrían ser acero normal forjado, aluminio o materiales híbridos poliméricos. El análisis permite al ingeniero medir la utilidad de los parachoques de acuerdo con el coste final en función del peso. Gracias a cuyo análisis, puede comparar entre los diferentes sistemas viables.

Frecuentemente, la disyuntiva no reside tanto en escoger los materiales cuanto en seleccionar los procesos. En los automóviles, la mayoría de las bielas (la pieza que une el pistón y el cigüeñal) son de forja. Para reducir el precio del proceso de moldeado final, algunas secciones de la pieza tienen más material del que realmente necesitan. Agréguese, además, la pérdida de cantidades considerables de material durante los procesos de forja y trabajado. Un proceso relativamente nuevo evita este derroche. Se trata de la forja por pulvimetalurgia. El proceso empieza con el metal pulverizado. Se coloca el polvo en un preformado o molde y se somete a presiones y a temperaturas extremadamente altas. Dado que el molde tiene una forma muy parecida a la del producto final, se minimizan las pérdidas de material. Además, este proceso necesita menos mano de obra. Sin embargo, el precio del molde es alto; problema que puede abordarse con métodos de diseño y fabricación asistidos por ordenador.

La competencia entre los diversos procesos de moldeado alcanza su máxima intensidad en el mercado de motores de aviación. Aquí lo que importa no es el precio, sino idear el proceso que proporcione componentes que satisfagan al máximo las especificaciones pertinentes. Por ejemplo, la temperatura de trabajo de un motor a reacción constituye un factor decisivo en su eficacia. Esa temperatura se ha aumentado drásticamente en las tres últimas décadas, sobre todo gracias al desarrollo de los materiales adecuados. Las paletas de turbina eran antes de forja. Hoy se obtienen por fundición, y en muchos casos con una estructura "solidificada direccionalmente", lo que prolonga la vida de la paleta y le confiere una mayor resistencia a altas temperaturas. En el futuro, algunas clases de paletas se fabricarán por pulvimetalurgia y procesos de solidificación rápida. Esta técnica, que en esencia consiste en provocar una rápida pérdida de calor en la colada, aumenta la tendencia de los procesos pulverulentos a generar estructuras altamente homogéneas con mejores propiedades.

Gracias a desarrollos como éste, las temperaturas de trabajo se han elevado a razón de unos siete grados Celsius por año, una cifra considerable si se tiene en cuenta que por cada 80 grados de incremento de temperatura se logra un aumento del 20 por ciento en el empuje del motor y un importante ahorro de combustible. Sin embargo, y pese a la importancia que se le reconoce a la satisfacción de las especificaciones de trabajo, el coste de producir materiales por solidificación rápida se juzga excesivo. Esos materiales podrían ponerse a la venta casi al mismo precio que los materiales pulverulentos convencionales si se alcanzan producciones anuales de un millón o millón y medio de kilos por planta de fabricación.

La solidificación rápida parece haber solucionado uno de los principales problemas de otro sector de la economía. Cada año se pierden 400.000 millones de kilowatt–hora de energía en la distribución de la electricidad a los usuarios, en todo el mundo. Parte importante de estas pérdidas se localiza en los transformadores de distribución, utilizados para reducir los altos voltajes de las líneas de transporte y distribución a las bajas tensiones utilizadas en la mayoría de usos domésticos e industriales. Los intensos campos magnéticos de los transformadores provocan corrientes parásitas, aleatorias y no aprovechables, que calientan el núcleo del transformador. Ciertas aleaciones de metales amorfos presentan las propiedades magnéticas idóneas para formar dicho núcleo del transformador; son, además, malos conductores, con lo que obstaculizan las corrientes parásitas. Evitan, por consiguiente, el calentamiento y reducen las pérdidas eléctricas.

En las aleaciones metálicas amorfas, los átomos no se disponen según una estructura cristalina, sino que se distribuyen de modo casi aleatorio. Ese tipo de materiales sale mejor con técnicas de solidificación rápida. El enfriamiento rápido hace que los átomos se "congelen" antes de que las fuerzas de interacción mutua tengan tiempo de ordenarlos en una estructura cristalina. Desde 1976, la General Electric Com-

	DEMANDA DE CERAMICAS (MILLONES DE DOLARES) 1985	1995	NECESIDADES DE MATERIALES EN POLVO PARA 1995 (MILLONES DE KILOGRAMOS)
HERRAMIENTAS DE CORTE	55	150-200	1.5
ROTORES DE TURBOCOMPRESORES	—	40-60	1.0
JUNTAS MECANICAS	80	150-200	3.0
GUIAS DE VALVULA DE AUTOMOVIL	—	100-200	5.0
TOTAL	135	440-710	10.5

5. CRECIMIENTO DE LA DEMANDA de cerámicas estructurales. Se concentrará, durante la próxima década, en las áreas relacionadas en el cuadro. Las aplicaciones reseñadas se apoyan en la resistencia de la cerámica al calor y al desgaste. Además de ello, los rotores de turbocompresores cerámicos se benefician del poco peso del material, lo que les permite alcanzar la velocidad de trabajo más rápidamente, y las juntas mecánicas se benefician de la resistencia de las cerámicas a los ataques químicos. Las necesidades de materiales cerámicos en polvo indicadas para el año 1995 se han calculado suponiendo que los mercados crecerán a un ritmo intermedio entre los valores máximo y mínimo previstos para esa misma fecha.

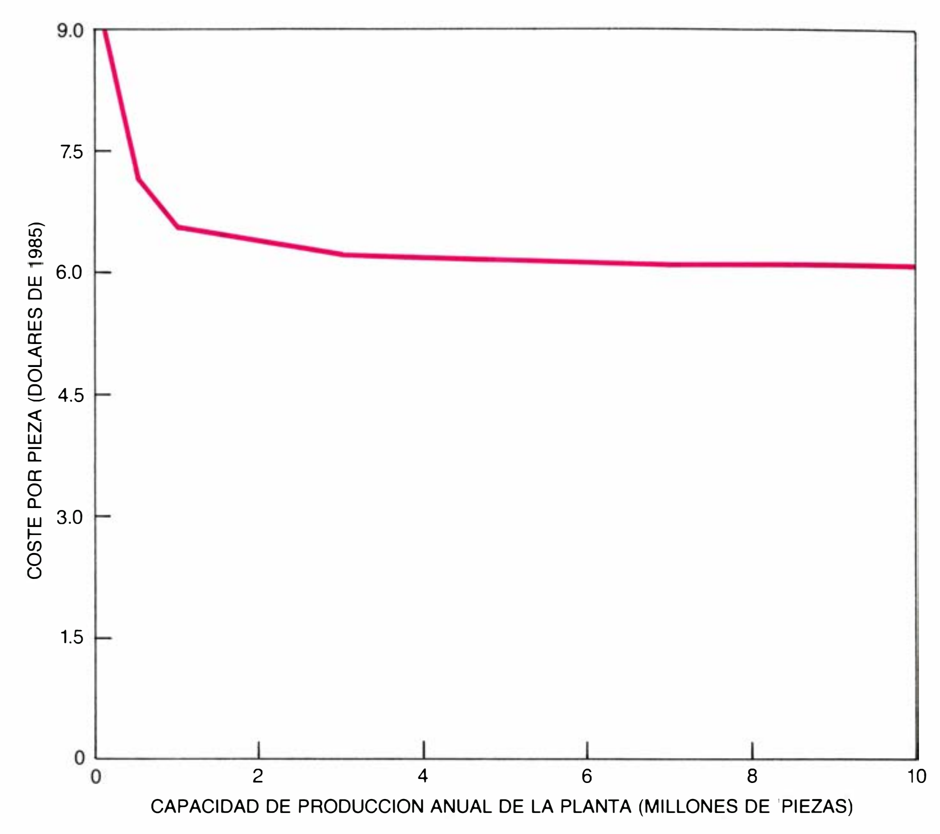
pany, la Allied–Signal Inc. y el Electrical Power Research Institute vienen financiando varios programas de investigación y desarrollo para descubrir nuevos procesos de producción del material y sopesar su viabilidad.

Hay ya en el mercado núcleos de transformador construidos con metal amorfo, y se espera que en los próximos años alcancen una amplia difusión. Con los nuevos dispositivos se obtiene la asombrosa reducción media de 75 por ciento de las pérdidas del núcleo. Se estima que sustituir en los transformadores los núcleos actuales por los de metal amorfo ahorraría, a los Estados Unidos, unos 40.000 millones de kilowatt–hora, y 100.000 millones de kilowatt–hora al mundo entero.

Los incentivos económicos y la necesidad de progreso tecnológico obligan a concentrarnos en tres áreas: las cerámicas, los materiales híbridos y los semiconductores. Las nuevas cerámicas estructurales son livianas y capaces de resistir el uso prolongado y el calor, cualidades que permiten su utilización en componentes que saquen un mayor rendimiento al combustible, incrementen la productividad de los procesos y faciliten la sustitución de materiales escasos o estratégicos. Los investigadores empeñados en este campo se afanan por superar dos graves defectos de las cerámicas: la fragilidad de las mismas y los altos costes de su tratamiento. Importantes ventajas técnicas y económicas justifican ese esfuerzo. De lograrse la aplicación satisfactoria de las cerámicas en los motores a reacción, la temperatura máxima de trabajo pasaría de 1000 a 1500 grados Celsius; supondría ello un ahorro notable en energía, pudiéndose utilizar incluso combustibles de menor calidad.

Tales expectativas crearán, entre los cinco y 20 próximos años, un marco propicio para el rápido crecimiento del mercado de las cerámicas, rentabilizando las inversiones. Pujanza que quizá no logre la cifra de miles de millones de dólares de que hablan previsiones recientes. Nuestro avance, moderadamente optimista, apunta hacia un mercado cercano a los 1000 millones de dólares en 10 años. Se prevén aplicaciones generalizadas en herramientas de corte, rotores de turbocompresores, juntas mecánicas y guías de válvulas de automóviles. El ritmo de crecimiento de sectores como el de las herramientas de corte y el de las juntas mecánicas será del orden del 12 por ciento anual.

El desarrollo de esos mercados deberá ir precedido de la resolución de varios problemas técnicos. Tendrá que

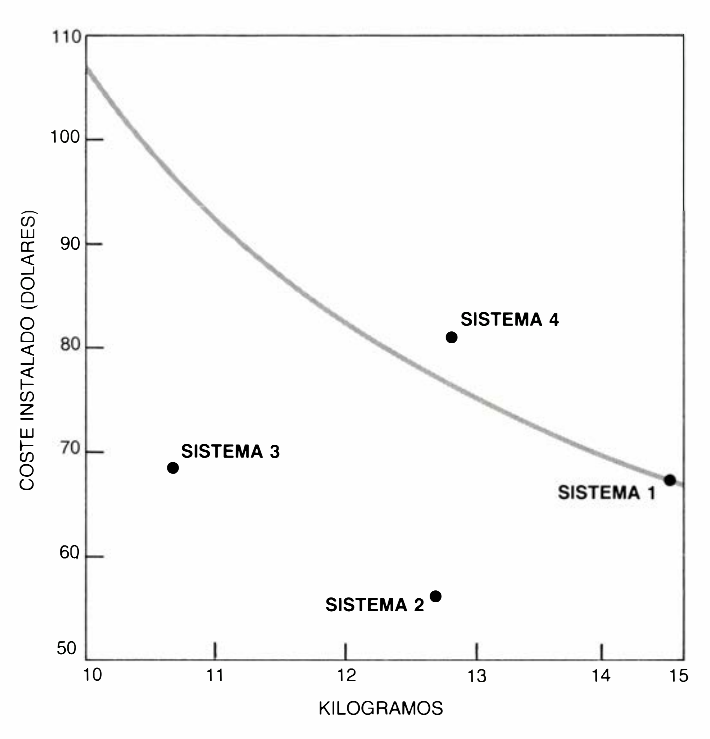


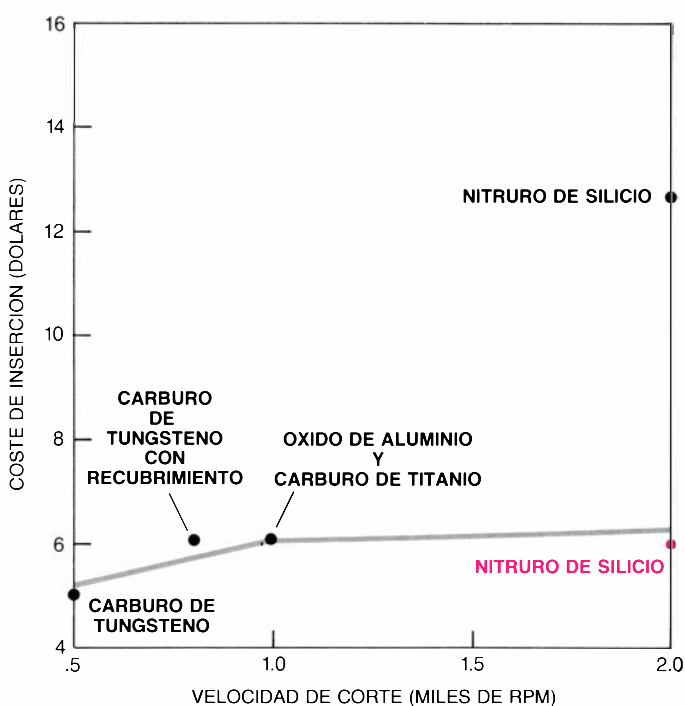
6. LAS ECONOMIAS DE ESCALA reducen notablemente los costes de los rotores de turbocompresores de nitruro de silicio producidos mediante moldes de inyección en virtud de la inversión que exige su fabricación. La curva muestra la relación entre el coste del rotor y el volumen de producción de una planta hipotética. El rendimiento del proceso de fabricación (la relación entre el contenido en material del producto y la entrada del material en el proceso de fabricación) se espera que alcance el 80 por ciento (más alto que hoy). El polvo de nitruro de silicio costará unos 22 dólares por kilogramo (precio muy inferior al actual).

asegurarse la estabilidad y la fiabilidad de la producción a gran escala. La producción mundial de polvo de nitruro de silicio se cifra hoy en torno a los 115.000 kilogramos. Si para 1995 se alcanza un punto intermedio de la previsión de consumo de herramientas de corte y rotores de turbocompresores antes citada, las cantidades de polvo requeridas sólo para esas dos aplicaciones rondarán los 1,1 millones de kilogramos, es decir, casi 10 veces el volumen actual. El problema del huevo o la gallina se nos presenta en la encrucijada de nuestro camino. Los productores de materias primas se han caracterizado por una reticencia tradicional a invertir en medios de producción hasta haber comprobado el desarrollo del mercado. Y los posibles grandes clientes de esos materiales, como la industria del automóvil, se han mostrado siempre reacios a adoptar nuevos materiales en tanto existan fuentes alternativas con el suministro asegurado.

Alcanzar el crecimiento previsto exigirá, en esas cuatro grandes aplicaciones citadas, una reducción de los costes. El proceso puede cuantificarse por análisis multiatributivo; se advierte así, por ejemplo, que aun exigiendo a los usuarios de herramientas de corte un importe ligeramente superior por la cuchilla de nitruro de silicio (de hasta seis dólares por pieza frente a los cinco de las cuchillas de carburo de tungsteno), habrán de efectuarse importantes reducciones de coste para poder ofrecer ese precio. En el conjunto de eventualidades que permitirían a los productores de herramientas de corte vender su mercancía a esos precios, habría que contar con que el polvo de nitruro de silicio bajara hasta los 33 o 44 dólares por kilogramo, se alcanzara un rendimiento general del proceso del 85 por ciento y el volumen de producción anual se cifrara en 250.000 piezas, como mínimo.

Habrá que llegar a logros similares en cuanto a los ritmos de producción y al coste de material en polvo para que los precios de los rotores de turbocompresores de nitruro de silicio bajen hasta los 14 dólares. Objetivo este irrenunciable si se quiere que esos rotores compitan con éxito ante los fabricados con superaleaciones metálicas. El análisis de los costes conduce a las siguientes conclusiones: los rendimientos de los procesos deben situarse en torno al 70 por ciento, o quizá superar ese valor (una mejora notable si se considera que





7. LINEAS DE ISOUTILIDAD que podrían interesar a los fabricantes de parachoques de plástico (*izquierda*) y a los usuarios de herramientas de corte (*derecha*). (Esas líneas indican las diversas combinaciones entre el coste del componente y su prestación). Derivan de un análisis multiatributivo de utilidad, técnica aplicada por uno de los autores (Clark) en la cual los datos de las entrevistas con usuarios de un material se transforman en funciones matemáticas. Si la relación coste-prestación de un material alternativo se sitúa por debajo de la línea de isoutilidad, resultará más atractivo que el sistema actual. Si el sistema cae por encima de la línea no será competitivo. El gráfico para el caso de los parachoques se apoya en la relación entre el precio y la prestación (el peso) para comparar la "utilidad" de dos parachoques actuales (*sistemas 1 y 2*), ambos hechos de poliuretano con un perfil de acero de refuerzo, pero con diferentes sistemas de absorción de energía, con un tercer parachoques con distinto mecanismo de absorción de energía (*sistema 3*) y un sistema fabricado con otra clase de polímero (*sistema 4*). En el caso de las herramientas de corte, la prestación se relaciona con la velocidad de corte admisible, en revoluciones por minuto. Aunque el nitruro de silicio permite velocidades de corte muy altas, la cerámica no será competitiva hasta que el precio por cuchilla baje a los 6 dólares (*rojo*).

el actual ronda el 25 por ciento); los precios del material en polvo deben descender hasta los 44 dólares por kilogramo y los niveles de producción superar las 250.000 unidades anuales.

Otro grave obstáculo que se opone al uso de las cerámicas en toda clase de aplicaciones estructurales es su poca fiabilidad. Las cerámicas tienden a romperse en añicos al avanzar las grietas abiertas. En ese sentido, el tamaño crítico de grieta para la mayoría de las cerámicas es de menos de 100 micrometros de diámetro, mientras que para la mayoría de aleaciones metálicas el valor es de algunos milímetros. Se están investigando varios métodos que mejoren la seguridad y fiabilidad de los componentes cerámicos.

De los nuevos materiales, los que conocen un progreso más espectacular son los híbridos (en inglés *composites*). Se trata de materiales que constan de un elemento aglutinante, o matriz, y un elemento reforzante (fibras, filamentos o materiales incluidos en la matriz). En el material híbrido se busca la combinación de las características funcionales de los elementos que lo componen, aprovechando la resistencia de cada integrante.

En los últimos 20 años se han diseñado muchos sistemas de materiales híbridos; uno de los que más familiares nos resultan es el plástico reforzado con fibra de vidrio (FRP). Asistimos hoy al desarrollo de una nueva generación: la de los materiales híbridos avanzados, expresión que se acuñó para designar los materiales que incorporan las nuevas fibras de altas prestaciones y distinguirlos de los FRP, más "rudimentarios". De este grupo, los híbridos poliméricos son los que tienen prevista antes su comercialización. También revisten gran interés los híbridos cerámicos; en éstos, el elemento aglutinante, o matriz, es cerámico y los materiales híbridos, metálicos.

Las propiedades mecánicas y físicas de esos híbridos son muy superiores a las de los materiales homogéneos; les aventajan en la relación de rigidez a densidad, en la relación de resistencia a densidad, así como en su resistencia a la fatiga y en tenacidad frente a las fracturas. Los materiales híbridos cerámicos oponen, además, una mayor resistencia al choque térmico.

La industria aeroespacial ha prestado el máximo interés al desarrollo de materiales híbridos avanzados. Si se consiguiera reducir el peso de las estructuras, bajarían los costes directos de operación y se aumentarían la capacidad de carga útil, la velocidad y el alcance. Todo redundaría en enormes beneficios, tanto para el sector comercial como para el militar. El programa de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) empeñado en la mejora del rendimiento energético de la industria aeronáutica, puesto en marcha conjuntamente con los principales fabricantes del sector, se ha consagrado durante años al desarrollo de los materiales híbridos y las posibilidades de su incorporación en las estructuras de los aviones. De momento sólo se han empleado materiales híbridos en algunos apartados. Citemos el timón de dirección del DC-10, el timón de profundidad del Boeing 727 y el alerón del Lockheed L-1011. Todas las superficies de control de los prototipos Boeing 757 y 767 se fabricarán con materiales híbridos de grafito-epoxy. El ahorro de 385 kilogramos sobre el peso total de material reducirá el consumo de combustible en un 2 por ciento, lo que supone una ganancia de 400.000 litros de combustible por avión y año. Además, los componentes construidos con materiales híbridos constan de menos piezas, lo que supone una rebaja en los costes.

En efecto, se ha estimado que la sustitución de las aleaciones de aluminio por un híbrido de grafito-epoxy en los aparatos de fuselaje ancho (los de más de 4 metros de diámetro) reduciría los



8. COMPONENTE DE TITANIO de un lanzador de misiles del caza F–15 en el momento de ser retirado de una prensa de 600 toneladas de la planta que la empresa McDonnell Douglas posee en St. Louis. El componente se ha moldeado a una temperatura de 900 grados Celsius. El proceso se realiza deformando intensamente el material en estado superplástico, es decir, por debajo del punto de fusión del metal en cuestión. El moldeo superplástico ejemplifica la interacción entre estructura y proceso: el metal debe tener una granulación excepcionalmente fina para tolerar una deformación tan extrema como la referida.

costes totales de producción en un 30 por ciento. La estructura, un 30 por ciento más ligera, ofrecería mayor resistencia a la fatiga y a la corrosión. Pero hay que someter la nave a múltiples ensayos antes de que los diversos materiales híbridos gocen de aceptación general. Entre esas pruebas, recordaremos la resistencia al impacto, el ruido en cabina y, la más importante, la autorización gubernamental.

Los semiconductores constituyen, sin duda, la familia de materiales de mayor importancia económica. Las ventas de la industria electrónica alcanzaron, en 1984, un valor de 172.000 millones de dólares.

La inexorable miniaturización de los circuitos integrados, junto con las irresistibles presiones para que los procesos adquieran la fiabilidad exigida y un menor coste, están eliminando del mercado los productores más débiles. La industria electrónica norteamericana (exceptuadas las principales compañías de ordenadores y comunicaciones) ve amenazado su futuro por la competencia que le plantean las de otros países. Con un volumen de ventas de unos 80.000 millones de dólares, su pérdida supondría un serio revés para la industria de esa nación. Su futuro dependerá de la capacidad que demuestre en el desarrollo de nuevos materiales que resulten fiables y económicos.

El progreso ulterior de ese campo obligará a los investigadores a abordar áreas más profundas, como la teoría cuántica y la física del estado sólido. Las dimensiones de los nuevos dispositivos son tan pequeñas que los efectos de superficie alteran el comportamiento electrónico de forma desconocida y a menudo sorprendente. Empiezan a controlarse ya dimensiones topográficas de escalas submicrométricas y límites de grosor de sólo decenas de angstrom, extensión comparable a la longitud de onda de la luz. Es de esperar que los dispositivos del futuro comprendan tan sólo pequeñas agrupaciones de átomos. La fiabilidad de la fabricación de estructuras complejas debe ser muy elevada en todas las etapas del proceso, sin olvidar, además, el entorno de máxima competitividad en que habrán de desenvolverse.

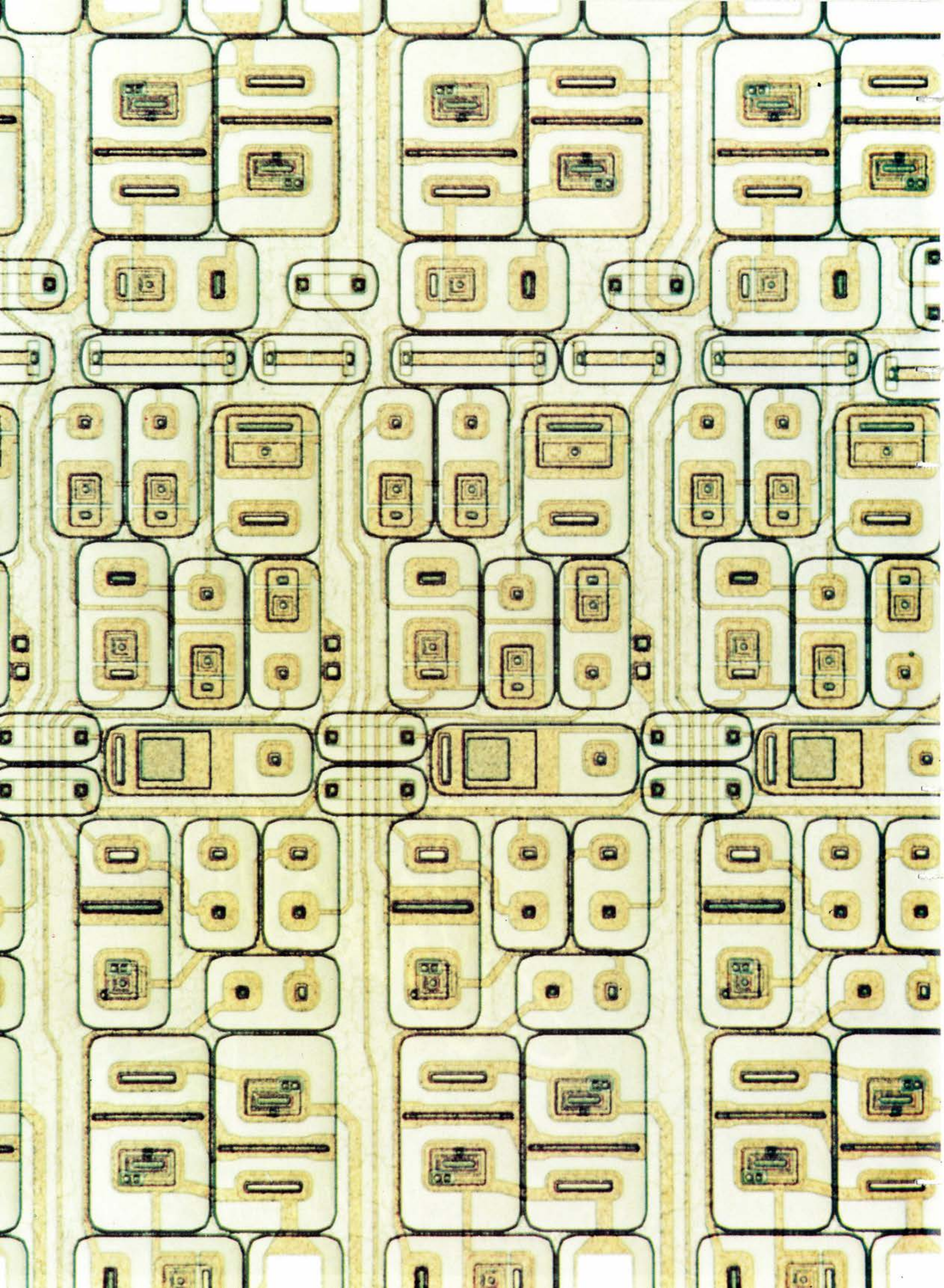
No todas las consecuencias que se derivan de ese creciente consumo de nuevos materiales serán positivas. A medida que aumente su difusión, podrían acentuarse graves problemas económicos y ambientales. Las economías de los países en vías de desarrollo, muchos de los cuales padecen ya fuertes tensiones por la caída de los precios del petróleo, podrían experimentar drásticas recesiones, si no la inversión de sus tasas de crecimiento, en el caso de que si los materiales remplacen a los naturales. Son particularmente vulnerables el cobre, el níquel, el cobalto, el cromo y el manganeso. Países como Gabón, Sudáfrica, Zaire, Zambia, Zimbabue, Brasil, Chile, Perú y Papúa-Nueva Guinea basan buena parte de su comercio exterior en la exportación de metales de primera necesidad. El descenso de su demanda les acarrearía problemas económicos de escala global y de estabilidad política.

Los nuevos materiales quizá no favorezcan la política de las sociedades industriales en pro de mejorar los efectos que sobre la salud y el medio ambiente ejercen los procesos productivos. Las emanaciones que se desprenden en la preparación de polvos cerámicos o resinas orgánicas no difieren cualitativamente de las que emite la minería y la siderometalurgia.

La fabricación de algunos nuevos materiales conllevará también ciertos riesgos para la salud del trabajador. La producción de cerámicas y materiales híbridos ocasionará la dispersión de partículas. Aunque no se ha documentado ningún efecto cancerígeno de esos materiales sobre los seres humanos, estudios de laboratorio han demostrado que las pequeñas fibras usadas en la fabricación de cerámicas de altas prestaciones causan tumores del revestimiento pulmonar. No se ha elaborado aún ninguna normativa legal que limite la exposición a fibras cerámicas en el entorno de trabajo.

La actividad química que caracterizará a los materiales híbridos en las etapas de producción incrementará su amenaza para la salud y la seguridad. Pese a la instalación de sistemas de ventilación, cabinas protectoras y mascarillas, algunas personas son sensibles a los vapores y no toleran el ambiente de las fábricas de plástico reforzado. Los polímeros y los híbridos poliméricos presentan especiales problemas relativos a la destrucción de sus residuos. Si bien los materiales híbridos termoplásticos podrían ser reciclables.

Los desarrollos en la ingeniería y ciencia de los materiales descritos en este artículo son, unas veces, precursores y, otras, fruto de las nuevas tecnologías. Ya sea para crear nuevas posibilidades o para satisfacer necesidades, la ingeniería y la ciencia de los materiales se encuentra en el vértice de una revolución indiscutida, que habrá de convertirse en factor clave para la configuración de la economía mundial.



Materiales para la información y la comunicación

El drástico incremento de la potencia de los sistemas que procesan y transmiten información, desde los tubos de vacío hasta los circuitos integrados y las fibras ópticas, ha sido posible gracias al avance de la ciencia de los materiales

John S. Mayo

Estamos en la era de la comunicación: entre las personas, entre las máquinas, entre pastillas ("chips") de silicio, entre los transistores de las pastillas. La información se procesa en redes de pastillas y se transmite mediante electrones o fotones a través de redes aún mayores, de hilo de cobre o fibras ópticas. Por supuesto, caben otras opciones: que las personas viajen y se reúnan para intercambiar y procesar datos, en lugar de que los ordenadores lo hagan por ellas. Pero en la mayoría de los casos esas opciones palidecen ante las posibilidades que ofrecen las conexiones electrónicas y fotónicas. En consecuencia, cada vez son más las actividades que antes quedaban a cargo de personas y hoy las ejecutan sistemas fabricados con materiales electrónicos y fotónicos.

El constante aumento de la funcionalidad, o potencia funcional, de los sistemas de información y comunicación se debe, sobre todo, a los progresos en la ciencia de los materiales. Las actuales redes de máquinas electrónicas y bases de datos ofrecen un nivel relativamente alto de funcionalidad. Para alcanzarlo fue preciso generar y transmitir señales eléctricas; posteriormente, hubo que controlarlas, amplificarlas y conmutarlas. Cada etapa ha ido asociada a nuevos materiales o métodos de procesamiento más refinados que la anterior.

Así, a finales del siglo XIX la función de los sistemas eléctricos limitábase a generar y transmitir electricidad; para misión tan simple sólo se necesitaban materiales sencillos: hierro para confinar los campos magnéticos en los generadores, cobre para conducir la electricidad y vidrio para aislar los circuitos. Al principio, la corriente eléctrica sólo podía conmutarse mecánicamente (como hacían los operadores telegráficos). Cuando se inventó el primer tubo de vacío, el triodo, en 1906, la electricidad pasó a controlarse electrónicamente. Para fabricar los tubos de vacío, los ingenieros tuvieron que ir más allá del hierro y el cobre, y familiarizarse con el uso de otros materiales –tungsteno y torio–, que se utilizaron como cátodos emisores de electrones.

El tubo de vacío era mucho más rápido que el conmutador mecánico. Y lo que es más importante, constituía el primer amplificador. Una débil señal aplicada en el electrodo de control (la rejilla) podía regular un flujo mucho mayor de electrones entre cátodo y ánodo; de este modo, las variaciones de la señal se reproducían en la corriente mayor. Con esta función amplificadora, los primitivos triodos ponían las bases de la radio y telefonía modernas y, hasta los años 50, fueron el componente principal de todos los circuitos electrónicos. Pero presentaban graves limitaciones. Consumían gran cantidad de potencia en forma de calor, ya que los electrones tenían que "evaporarse" del cátodo. Para que los sistemas comerciales resultaran fiables, no podían incorporar más que unos pocos cientos de tubos de vacío.

La construcción de circuitos de mayor complejidad exigía un nuevo dispositivo: el transistor, inventado en 1947 en los Laboratorios Bell Telephone. Le bastaba una potencia un millón de veces menor que los tubos de vacío (porque no necesitaba caldeamiento); era considerablemente más fiable y un conmutador mucho más rápido. Estas propiedades lo convirtieron en el elemento básico del ordenador digital, desarrollado en la misma época. Con la generalización del uso de los ordenadores y transistores, durante los años 50, el interés de la investigación de materiales, al menos en la industria electrónica, se desplazó hacia los integrantes de los transistores: semiconductores de germanio y silicio.

Con los ordenadores transistorizados, el aprovechamiento de la capacidad de interconexión entre los componentes electrónicos para construir máquinas de procesamiento de información no había hecho sino comenzar. La capacidad de procesamiento de información de un ordenador depende en parte de la velocidad de conmutación de sus transistores. Cuanto más pequeño sea un transistor más rápido conmutará. A finales de los años 50, el tamaño de los transistores disminuyó drásticamente con el desarrollo de los circuitos integrados en los que transistores, resistencias, condensadores y sus

1. PASTILLAS DE CIRCUITOS INTEGRADOS: son el corazón de los modernos sistemas de información y comunicación. La pastilla de silicio de la fotografía es un circuito especializado del sistema de conmutación telefónica más avanzado de AT&T, el 5ESS. Conocido por conmutador de puerta de diodos, se conecta directamente a cuatro líneas telefónicas: dos de entrada y dos de salida. Para funcionar debe resistir los altos voltajes necesarios para que suenen los timbres telefónicos, así como las sobretensiones generadas por las descargas de rayos. La resistencia a altos voltajes se logra colocando los elementos de circuito en islas de silicio monocristalino, empotradas en un substrato de silicio policristalino, y rodeando cada isla con una pared de dióxido de silicio aislante, en forma de bañera. Estas paredes, de un espesor aproximado de cuatro micrometros, se distinguen en la superficie de la pastilla como rectángulos de color negro. Las islas de silicio monocristalino, encerradas en el interior de las paredes, son de color gris uniforme, mientras que el sustrato policristalino exterior es jaspeado. Las islas grandes que aparecen a pares en las partes superior e inferior de la fotografía son diodos de puertas. Los elementos de circuito están interconectados por conductores de aluminio de color dorado. La pastilla tiene unas dimensiones aproximadas de tres por cuatro milímetros.

interconexiones se fabricaban juntos, sobre una pastilla de semiconductor. El silicio resultó el material más apropiado para las pastillas; durante el último cuarto de siglo se ha investigado el crecimiento de cristales de silicio sin defectos y las técnicas que permitan alojar cada vez más componentes en una pastilla monocristalina.

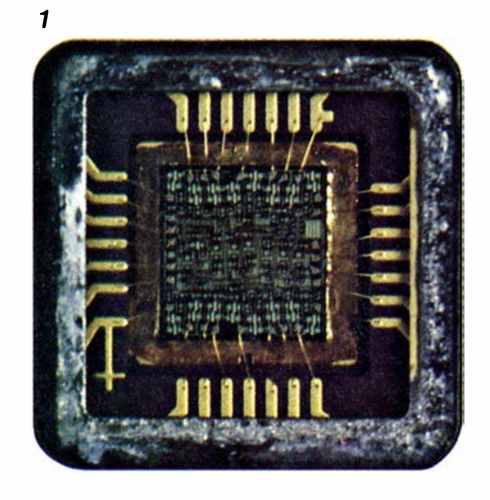
Las interconexiones en miniatura han facilitado la explosión de la capacidad de procesamiento de la información, y ello no sólo porque los circuitos integrados sean más pequeños y rápidos, sino también porque son baratos. El bajo precio de las pastillas de silicio ha permitido su empleo en gran cantidad de dispositivos a los que puede acceder el gran público. Por ejemplo, se estima que el año pasado se vendieron en los Estados Unidos entre siete y nueve millones de ordenadores personales, cualquiera de los cuales supera con creces la capacidad del ENIAC, el primer ordenador digital de tubos de vacío, montado en 1945 y del tamaño de una habitación.

El triunfo de los circuitos integrados ha ido acompañado de la expansión de las interconexiones en niveles superiores. En un pasado no muy lejano, la telecomunicación sólo se producía entre parejas de personas. Ahora, el propietario de un ordenador personal puede obtener información de bases de datos de todo el país; además, los ordenadores se comunican directamente entre ellos, sin intervención humana. La expansión de la información ha desencadenado la expansión de las comunicaciones.

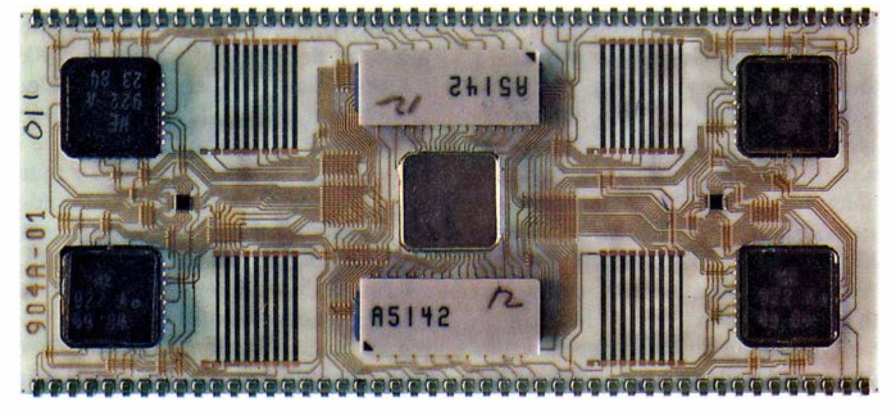
El deseo de comunicar grandes cantidades de información ha estimulado el desarrollo de una nueva disciplina técnica: la fotónica. En un sistema fotónico, la información se transporta a través de impulsos luminosos. La fuente de luz es un láser semiconductor, o un diodo emisor de luz; el medio de transmisión, una guía de ondas de fibra de vidrio de sílice, del espesor de un cabello. Los impulsos de luz (y con ellos la información) pueden transmitirse a través de la fibra óptica a una velocidad mucho más elevada que las señales eléctricas por el cable coaxial. El primer cable óptico transatlántico para telefonía, cuya puesta en servicio está prevista para 1988, tendrá capacidad para unas 40.000 conversaciones simultáneas. (A modo de comparación, el último cable coaxial, tendido a mediados de los años 70, no soporta más de 10.000 conversaciones.)

En los Estados Unidos, casi todos los nuevos cables telefónicos de larga distancia son ópticos. El vidrio está desplazando también al cobre en ámbitos locales: se emplean fibras ópticas en una tercera parte de las ampliaciones de "canales de alimentación", que llevan la línea telefónica desde la central hasta los grupos de abonados. En efecto, de no ser por las fibras ópticas, que resultan mucho más pequeñas que los cables metálicos, costaría incrementar el número de canales locales, pues en algunas ciudades los tendidos subterráneos están ya saturados. También se empiezan a emplear enlaces ópticos para conectar máquinas electrónicas vecinas o sus módulos de trabajo. En tales aplicaciones se imponen las fibras ópticas por su inmunidad frente a interferencias electromagnéticas, así

1

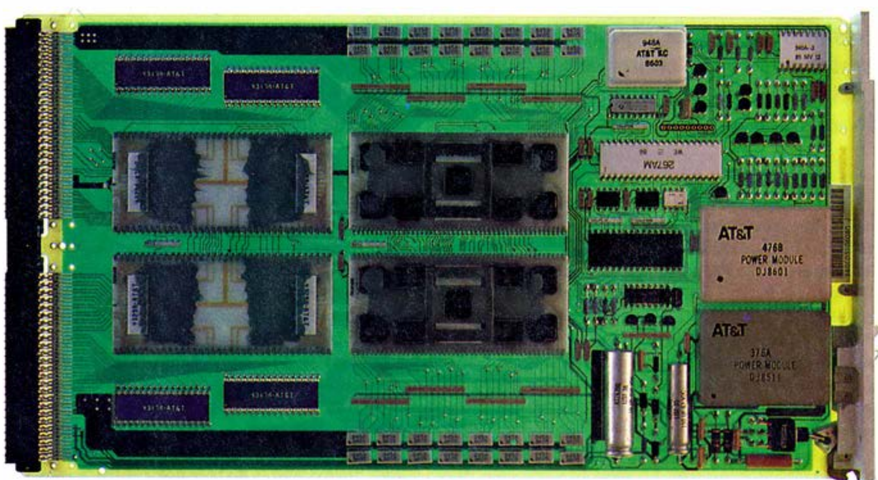


2



3





2. JERARQUIA de interconexiones de un sistema de información y comunicación. Se ilustra con el sistema de conmutación telefónica 5ESS. En un soporte cerámico dotado de patillas de oro se monta una pastilla de diodos de puerta (*1*). Las pastillas encapsuladas están interconectadas por conductores de oro impresos en un circuito híbrido integrado (*2*), también cerámico; las propiedades aislantes de la cerámica permiten al circuito resistir altos voltajes. El circuito híbrido mide unos nueve centímetros de largo por cuatro de ancho y lleva ocho pastillas con diodos de puertas sobre la superficie posterior, además de los cinco visibles en la anterior. Los circuitos híbridos están interconectados con otros componentes en una tarjeta de resina que tiene conexiones de cobre impresas en ambas caras (*3*). (Algunas tarjetas tienen muchas capas de conexión.) Estas fotografías y las que aparecen en la figura 3 se tomaron en los Laboratorios AT&T de Naperville, Illinois.

como por su gran capacidad de transmisión y pequeño tamaño.

El progreso de la fotónica ha sido notablemente rápido a partir de la invención del láser, en 1958. En ese corto período los ingenieros de materiales han desarrollado láseres suficientemente fiables y duraderos para operar en el fondo del océano (se ha comprobado que los láseres más eficaces son los de semiconductores compuestos, por ejemplo, fósforo de indio, galio y arsénico), así como métodos para fabricar un vidrio tan puro y transparente que una señal de luz puede viajar cientos de kilómetros sin necesidad de regenerarla. En lo que atañe a las comunicaciones, los compuestos semiconductores y el vidrio de elevada pureza son a la fotónica lo que el hierro y el cobre fueron a los sistemas de transmisión eléctrica del siglo pasado, sólo que los materiales y los métodos de procesamiento revisten mayor complejidad que los de la época de Thomas Edison.

Puede que la fibra óptica remplace pronto a la electrónica en la tecnología de las comunicaciones, pero la sustitución de las máquinas electrónicas que procesan la información por sistemas fotónicos parece mucho más difícil. Por ahora no existen en el mercado dispositivos de control fotónico equivalentes al tubo de vacío o al transistor, y no digamos un circuito integrado o un ordenador estrictamente fotónicos. Para amplificar una señal óptica (la forma más elemental de control) hay que comenzar por transformarla en señal eléctrica mediante un fotodetector (fabricado también con compuestos semiconductores); luego se amplifica la señal eléctrica y finalmente se transforma de nuevo en luz mediante un láser. Así como antes de que se descubriera el tubo de vacío las señales eléctricas sólo podían controlarse de forma mecánica, en los sistemas actuales las señales luminosas se controlan electrónicamente.

A pesar de su rápido progreso, la fotónica se encuentra todavía en un estado bastante primitivo. Uno de los dos principales objetivos comerciales de los investigadores en el sector de la información y las comunicaciones concierne a la potencia funcional de los sistemas fotónicos: pretthe duplicar las cotas alcanzadas por la electrónica. Los incentivos son grandes: el ordenador fotónico, por ejemplo, operaría miles de veces más deprisa que el electrónico. Pero se trata de una meta a largo plazo. El segundo objetivo, más inmediato, busca rebajar el coste de la funcionalidad de los dispositivos comerciales para abrir a los sistemas fotónicos y electrónicos un campo más amplio de aplicaciones.

El volumen de los materiales y de los costes de un moderno sistema de información o comunicaciones responde a la necesidad de llevar electrones y fotones de un punto a otro. En otras palabras, el gasto no reside tanto en los componentes del sistema cuanto en su interconexión. Lo cual se cumple en todas las escalas, desde la de silicio a la red telefónica intercontinental. Por consiguiente, resulta apropiado analizar el coste de los sistemas a través del precio por interconexión a cada escala: el coste de la pastilla o de la red dividido por el número de interconexiones que proporciona. Como era de esperar, cuanto más larga es la interconexión, más material se necesita para realizarla y mayor es su coste.

Los conductores de aluminio que enlazan elementos de circuito en una pastilla de silicio no suelen medir más de unos micrometros de longitud. Pueden depositarse por millones en una única "exposición", interponiendo una fotomáscara que define el modelo de cableado. Aunque el modelo alcance una complejidad extrema, cada interconexión no cuesta ni la milésima de peseta. En cambio, la conexión de la pastilla al cableado exterior es notablemente más cara. La pastilla se monta primero en un soporte plástico o cerámico que mide un par de centímetros de ancho y está equipado con una docena de patas metálicas, o incluso más. El coste de cada pata de la pastilla con soporte plástico es por lo menos de una peseta: mil veces más que el coste por interconexión dentro de una pastilla.

Los soportes de la pastilla se montan en una tarjeta de circuito impreso, bien directamente o fijándolos primero a un dispositivo cerámico llamado circuito integrado híbrido. El coste de la tarjeta de circuito impreso depende de las capas de conexiones de que conste. En sistemas complejos, los circuitos impresos presentan ocho o más capas de fibra de vidrio recubiertas con una resina, cada una de ellas con un diagrama de conexiones de cobre impreso. Las capas se unen y conectan eléctricamente con elementos de cobre insertos en la resina. Las tarjetas multicapa ofrecen gran número de caminos de interconexión, pero su tamaño (en muchos casos el de esta página) requiere gran cantidad de materiales. Además, cuesta bastante ensamblarlas y verificarlas. Del soporte de la pastilla a la tarjeta de circuito impreso, el coste por interconexión aumenta por un factor de 10, hasta unas 10 pesetas.

Una tarjeta impresa repleta de soportes de pastillas (a la vez que otros componentes discretos, como resistencias y condensadores) se denomina paquete de circuitos. Un ordenador personal, o un videocassette, viene a contener el equivalente a un paquete de circuitos; ahora bien, para construir un sistema más complejo deben interconectarse varios. A menudo las interconexiones se establecen sobre una gran tarjeta multicapa, llamada panel posterior, y los paquetes de circuitos se colocan verticalmente en un armazón metálico y se unen, de forma óptica o eléctrica, al panel posterior. El coste por interconexión en este nivel es de unas cien pesetas.

Cada vez más, las conexiones entre armazones se efectúan mediante fibras ópticas, en particular cuando los armazones se encuentran en máquinas diferentes, separadas por varios kilómetros. El coste de dicha interconexión, muy alto, aumenta con la distancia. Un solo enlace por fibra que atraviese los Estados Unidos cuesta millones de dólares, un billón de veces más que una interconexión en una pastilla de silicio. Pocos usuarios tienen la necesidad de, o los recursos para, mantener una conexión privada permanente; resulta más lógico alquilar parte de la red nacional de telecomunicaciones.

Los costes de interconexión consumen, por tanto, gran parte de la inversión total que requiere un sistema. Ello plantea a los diseñadores de soporte físico dos grandes problemas. El primero es llevar la complejidad de las pastillas de silicio a su límite máximo, no por el afán de montar en una sola pastilla el máximo número de elementos de circuito, sino para que, en lo posible, las conexiones se hagan donde resultan más baratas. El segundo reto es aprovechar al máximo la capacidad de fibras y láseres para amortizar el coste de las interconexiones que no pueden miniaturizarse.

Desde 1960, el número de componentes de circuito de las pastillas más avanzadas han venido duplicándose cada año. Hoy se ofrecen en el mercado pastillas de memoria que contienen más de dos millones de componentes interconectados mediante unos cinco millones de conductores. Hace menos de tres décadas, antes del ad-

venimiento de la microelectrónica, un operario habría tardado más de 10 años en montar dos millones de componentes. El producto que antes exigía el trabajo de 10 hombres-año hoy cuesta unos pocos miles de pesetas, y a largo plazo su valor se reducirá seguramente a unos centenares.

¿Hasta dónde puede llegar la integración de circuitos? Lo estimaremos si dividimos el tamaño de la mayor pastilla factible por el del menor transistor factible. El límite del transistor es de índole física. Un transistor está constituido por tres regiones adyacentes de la pastilla: emisor, base y colector. La aplicación de un pequeño voltaje a un contacto metálico (puerta) de la base controla el flujo de electrones (o de "huecos" positivos) que discurre del emisor al receptor. Las tres regiones adquieren las propiedades eléctricas deseadas dopándolas (contaminándolas) con átomos de impureza. El número de átomos de impureza necesarios establece un límite teórico a las dimensiones mínimas del transistor: no menos de unas 400 constantes de la red por lado (la constante de la red mide el tamaño de la celda unitaria de un cristal). En la práctica, el espacio ocupado por un transistor en una pastilla debe triplicar esa longitud. El silicio tiene una constante de red de $5,4 \times 10^{-8}$ centímetros de lado, así que el menor transistor factible tendría unas dimensiones de $1200 \times 5,4 \times 10^{-8}$ centímetros: 10^{-4} centímetros cada lado, en números redondos. Ese transistor ocuparía aproximadamente 10^{-8} centímetros cuadrados de la superficie de la pastilla.

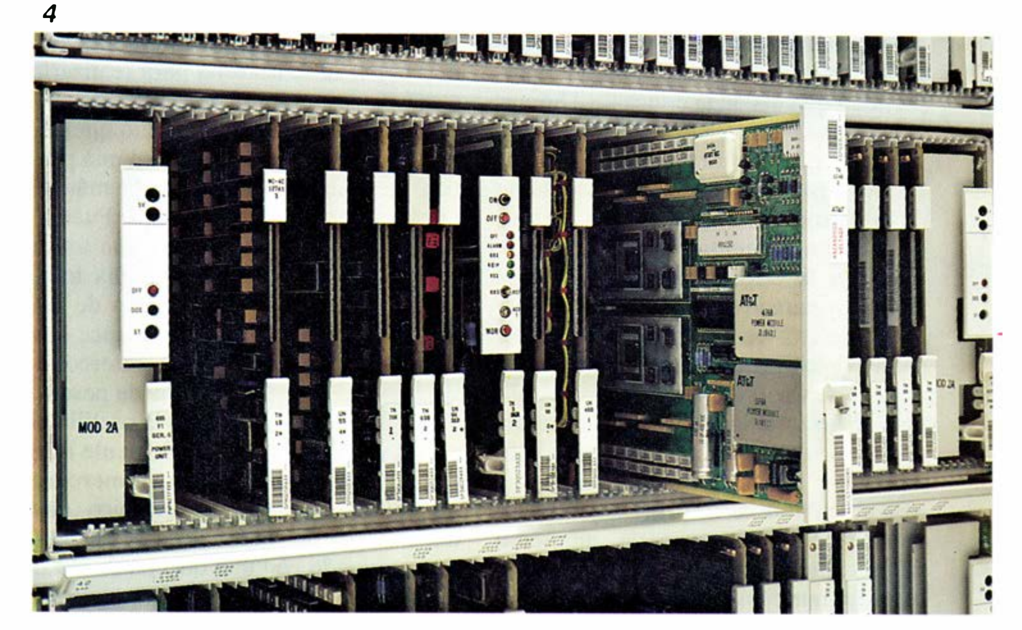
El límite del tamaño de la pastilla constituye también un techo económico. Las pastillas se fabrican rebanando un cilindro de monocristal de silicio en unas 50 obleas muy finas y diviendo después cada una de ellas en unas 100 pastillas. El silicio contiene inevitablemente defectos microscópicos; toda pastilla con un defecto de acabado en su superficie debe descartarse ya que no funcionaría correctamente. Cuanto mayor sea la pastilla, más probable es que padezca algún defecto: la producción de pastillas sin defectos se hace más difícil conforme aumenta su tamaño. Hoy no sale a cuenta fabricar pastillas de áreas superiores a un centímetro cuadrado. En el futuro, el límite puede que aumente hasta unos 10 centímetros cuadrados.

En cada pastilla sólo puede aprovecharse un 10 por ciento del área, es decir, un centímetro cuadrado, para ubicar los transistores; el resto se necesita para interconexiones y para aislar entre sí los componentes del circuito. Si cada transistor ocupara 10^{-8} centímetros cuadrados, en la pastilla habría espacio para 100 millones de transistores (u otros componentes). Según estos cálculos, la complejidad de los circuitos integrados podría todavía incrementarse en un factor de 50 en relación a las actuales pastillas de dos millones de componentes, sin rebasar el límite de la tecnología del silicio.

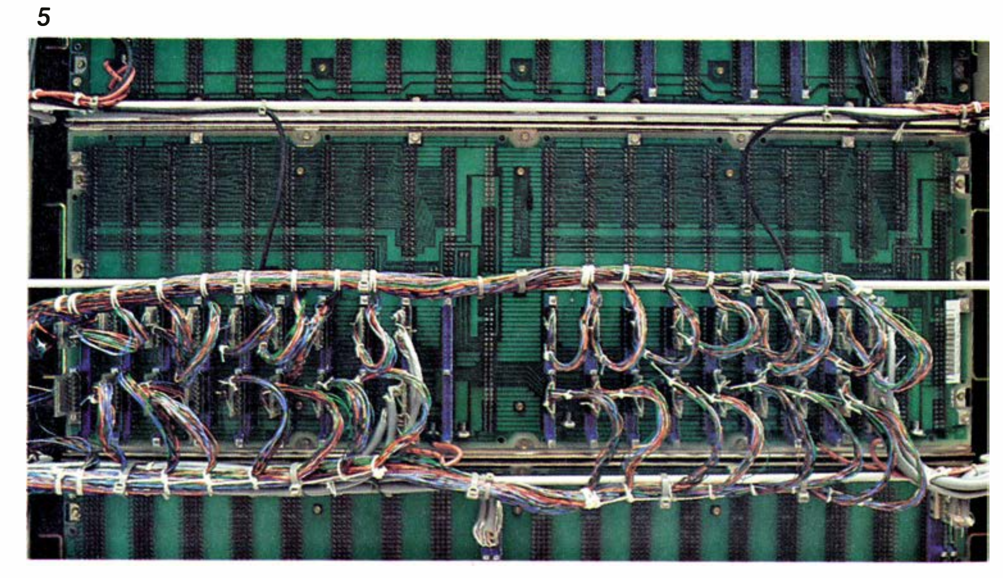
De mantenerse el actual ritmo de progreso, el límite se alcanzará dentro de una década. La previsión supone que los investigadores desarrollarán nuevas técnicas para imprimir rasgos más finos en las pastillas; en ese sentido, algunas de las técnicas más prometedoras para definir la disposición del circuito son las que se basan en el empleo de haces de electrones y rayos X, en vez de la luz visible. Al mismo tiempo, tendrá que rentabilizarse la fabricación de pastillas mayores, y ello gracias a un mejor conocimiento teórico de los defectos del silicio que rebajan su rendimiento económico. Los avances teóricos, junto con la automatización de las fábricas de pastillas, deberían conducir a una reducción del número de defectos.

Para superar los límites del silicio, los investigadores tendrán que cambiar a otros materiales y diseños de la pas-

4



5



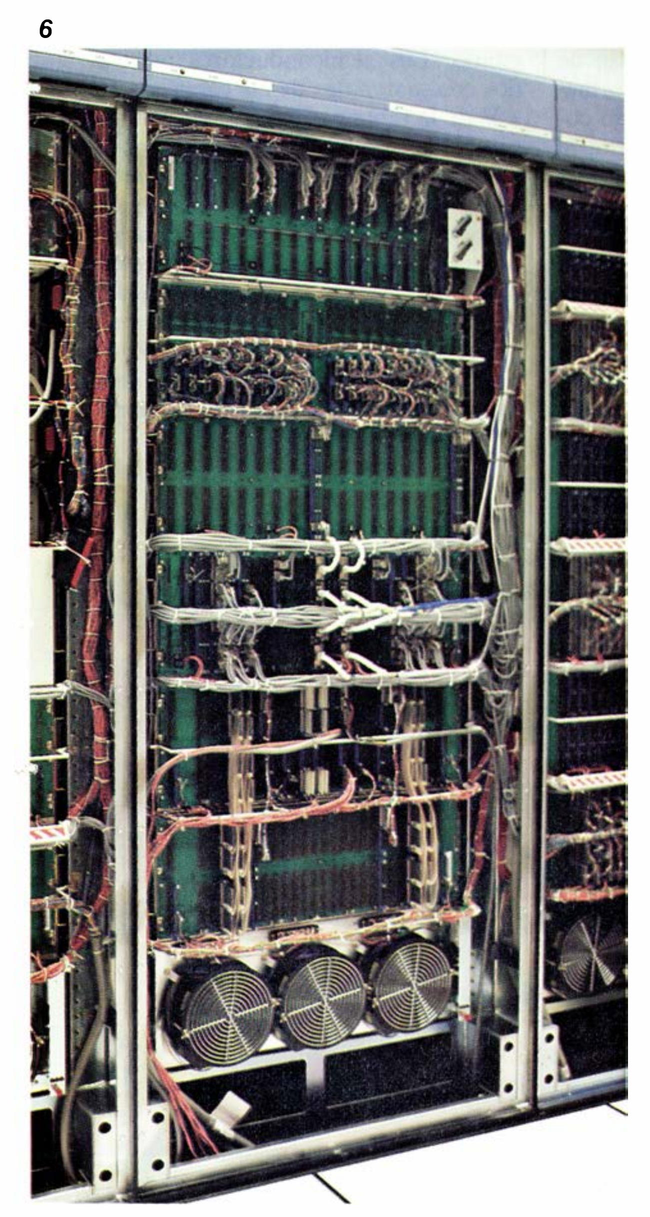
3. NIVELES SUPERIORES DE INTERCONEXION en el 5ESS, característicos de un sistema complejo. Las tarjetas de circuito impreso con sus componentes, denominadas paquetes de circuitos, se colocan en un armazón metálico (*4*) y se unen, con conectores de una aleación de paladio, al panel posterior situado en la

tilla. Ejemplo de lo primero es el empleo de arseniuro de galio, con el que se obtienen circuitos integrados más rápidos, si no más complejos. Por lo que se refiere a lo segundo, quizá lleguen a fabricarse pastillas tridimensionales, cuyos componentes se dispongan en capas superpuestas, y no sólo en la superficie, como ocurre ahora.

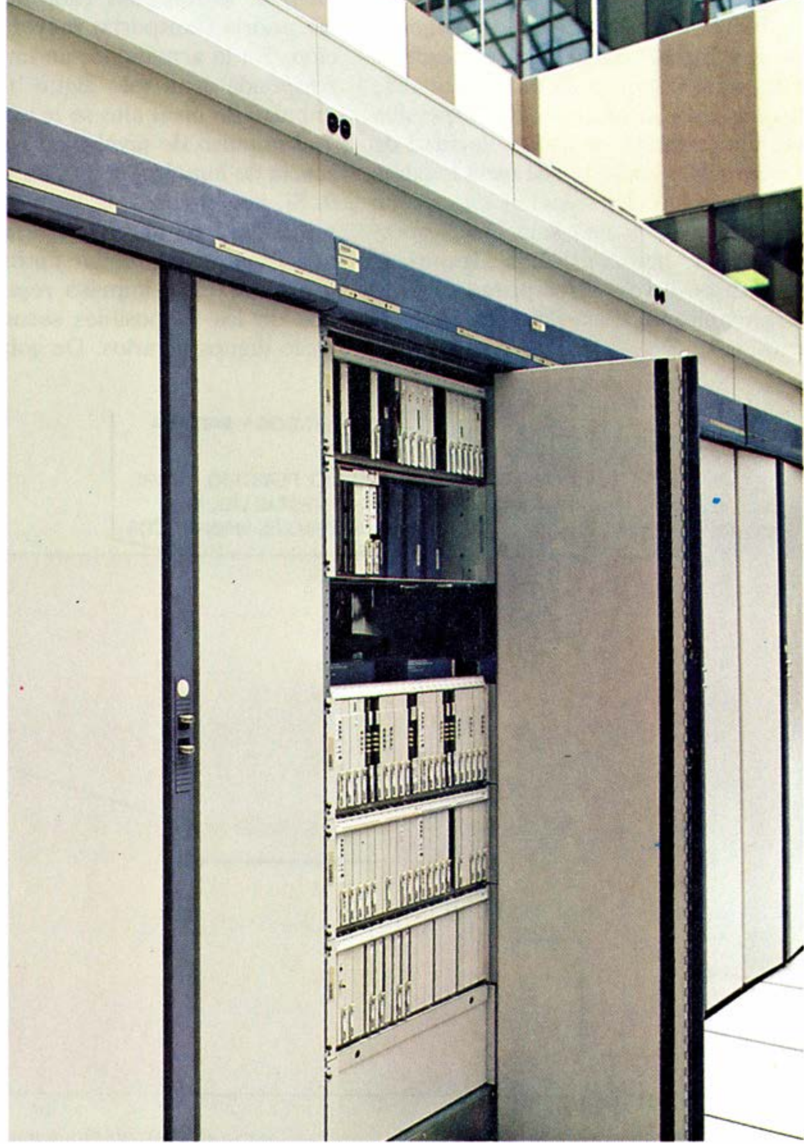
Si nos es dado estimar el límite de la integración de circuitos sobre silicio, podemos también calcular el límite de la capacidad de transmisión alcanzable con la actual tecnología de láser y fibra óptica. Varios factores influyen en el análisis: máxima potencia de salida del láser, número de fotones necesario para definir un impulso digital sin ambigüedad teniendo en cuenta el ruido intrínseco de los detectores (se establece ahora en unos 100) y distancia a la que las fibras ópticas transmiten un pulso de luz sin atenuación ni distorsión. El resultado se expresa como el producto de la cadencia de impulsos por la máxima separación entre repetidores. (Los repetidores son dispositivos que amplifican y regeneran una secuencia de impulsos a intervalos regulares a lo largo de la fibra.) El límite de la tecnología actual se sitúa en 10^{15} impulsos-kilómetro por segundo, mientras que el mejor resultado obtenido en las investigaciones se cifra en 2×10^{10} impulsos por segundo, con una separación entre repetidores de 68 kilómetros; en otras palabras, unos 10^{12} impulsos-kilómetro por segundo. El sistema actual más evolucionado está unas 1000 veces por debajo del límite teórico. Probablemente pasarán unos 10 años antes de alcanzarse ese límite en el laboratorio y 20 para que lo logren productos comercializables.

¿Qué otras mejoras importantes nos acercarán a ese límite? Las fibras de vidrio comerciales son ya satisfactorias; la atenuación es tan pequeña que sirven para la mayoría de los proyectos de telecomunicación en que se emplean fibras. Un objetivo a largo plazo es cubrir los océanos con cables ópticos sin repetidores, pero esa meta está probablemente fuera del alcance de la tecnología de las fibras de sílice y se necesitarán nuevos materiales constitu-

6



7



parte trasera del anaquel. Los paquetes de circuitos se interconectan a través del panel posterior mediante pequeños cables, o pistas de cobre impresas (*5*). Varios de esos paneles se apilan en un bastidor de unos dos metros de altura (*6*), interconectando los diferentes bastidores con fibras ópticas (los pequeños cables blancos del centro) y con hilos de cobre. Un sistema 5ESS típico (*7*) consta de unos 40 bastidores, que pueden conmutar hasta 26.000 líneas telefónicas.

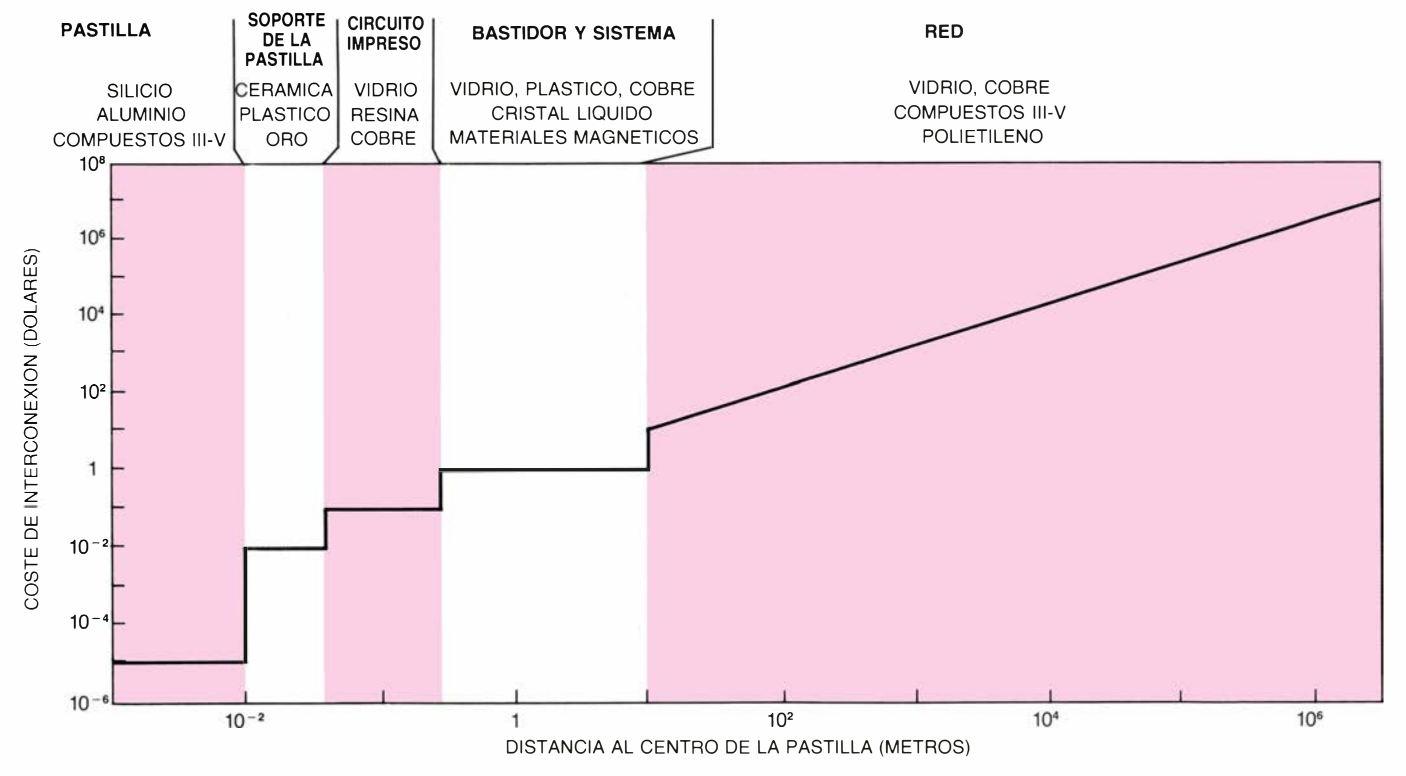
yentes, por ejemplo, fluoruros de metales pesados. En lo que concierne a la fibra óptica, la tendencia se orienta hacia la reducción del precio, más que a una mejora de la calidad.

Por su parte, si se quiere sacar el máximo partido de la tecnología actual, habrá que mejorar al menos dos aspectos de los láseres. Primero, tienen que generar luz mucho más pura. Aunque solemos hablar del láser en términos de radiación en una sola frecuencia, lo cierto es que los que están en servicio emiten varias líneas espectrales muy próximas. Puesto que las ondas luminosas de distinta frecuencia viajan a velocidades diferentes, un impulso que contenga varias frecuencias tiende a difuminarse en su avance a lo largo de la fibra; fenómeno que se conoce por dispersión cromática. Si esos impulsos se transmiten a alta velocidad y no se regeneran a lo largo del camino por repetidores, acaban superponiéndose unos a otros, con lo que se pierde la información contenida en la secuencia de impulsos. Por tanto, la dispersión cromática limita tanto la velocidad de los impulsos como la distancia máxima de repetición. La solución está en un láser que emita una sola línea espectral. Ya se han construido algunos de esos dispositivos, y los primeros diseños empiezan a aparecer en el mercado.

En segundo lugar, algunos láseres deben ser sintonizables, cual transmisores de radio; esto es, deben ser capaces de emitir luz pura en distintas frecuencias seleccionables. Los láseres sintonizables provocarían un súbito incremento de la capacidad de las fibras ópticas, porque permitirían sintonizar muchos láseres a diferentes frecuencias, que transmitieran simultáneamente secuencias independientes de impulsos sobre la misma fibra. Esta táctica, denominada multiplicación por división de frecuencia, se ha utilizado para aumentar la capacidad de los cables eléctricos. (La multiplicación por división en el tiempo, donde se entrelazan secuencias de impulsos de baja velocidad para formar una secuencia de mayor velocidad, se emplea en cables eléctricos y ópticos.)

Y lo que es más importante aún, con un láser sintonizable cada impulso de luz podría transportar mayor información. En la actualidad, un impulso corresponde a un solo dígito binario; al impulso de nivel alto se le asigna un 1 y al impulso de nivel bajo (o a la ausencia de impulso) se le asigna el valor 0. Si, por ejemplo, el transmisor láser se pudiera sintonizar rápidamente a una frecuencia a elegir entre 32 muy próximas, cada impulso representaría una de las 32 posibles secuencias de cinco dígitos binarios. De golpe, la capacidad de información de la fibra se quintuplicaría. Los láseres capaces de este tipo de modulación de frecuencia digital cuantificada (FM) necesitarían un nuevo tipo de detector en el extremo receptor de la fibra, sensible a la frecuencia de la señal; su actuación sería comparable a la de los receptores de radio FM. Los actuales diodos sensibles a la luz y los fotodetectores de avalancha sólo miden la intensidad del impulso luminoso.

El alcance del límite de la tecnología actual de las comunicaciones fotónicas dependerá también del progreso de la electrónica, ya que el láser emite sus impulsos a la velocidad que le dicta su circuito electrónico de excitación. Los circuitos integrados de silicio más rápidos generan alrededor de tres mil millones de impulsos por segundo. Los semiconductores fabricados con materiales de las columnas III y V de la tabla periódica pueden ofrecer cadencias superiores aún, por la sencilla razón de que los electrones se mueven más deprisa en esos compuestos que en el silicio. El arseniuro de galio es el compuesto III-V mejor estudiado. Ciertas desventajas le impiden remplazar por completo al silicio: presenta, por ejemplo, más defectos, lo cual significa que las pastillas de arseniuro de galio suelen ser más pequeñas



4. COSTE DE INTERCONEXION, que es función de la longitud. El gráfico, de escalas logarítmicas, muestra el precio aproximado y los principales materiales empleados en cinco niveles de interconexión. Por ejemplo, cada uno de los conductores metálicos de una pastilla de silicio fabricada con las técnicas actuales cuesta alrededor de una milésima de peseta. Una sola fibra óptica de la red telefónica de larga distancia puede costar cientos de millones de pesetas.

y sus circuitos menos complejos. Pero dondequiera que se necesiten circuitos muy rápidos, como en el caso de las comunicaciones fotónicas, el arseniuro de galio es el material idóneo.

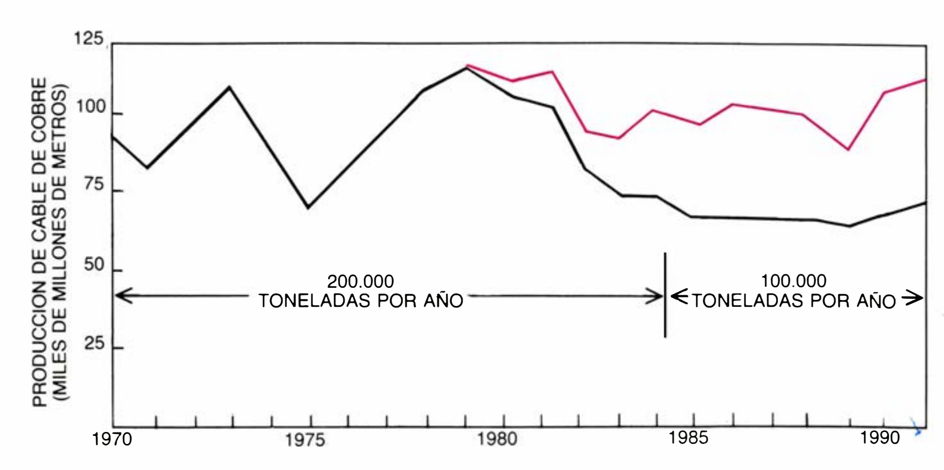
En la revolución fotónica que se avecina, el arseniuro de galio y otros compuestos semiconductores desempeñarán un papel central. Los láseres, diodos emisores de luz y fotodetectores se fabrican con semiconductores III-V; el silicio no resulta apropiado, porque tiende a emitir y absorber calor en vez de luz. Los dispositivos fotónicos se han fabricado con compuestos como fosfuro de indio, arseniuro de galio y aluminio y fosfuro de indio, galio y arsénico; pero éstos sólo son los primeros de una larga serie de compuestos utilizables. Con las modernas técnicas de crecimiento de cristales, principalmente la epitaxia de haces moleculares, los investigadores no están limitados a los compuestos que se dan en la naturaleza; pueden elegir las combinaciones de elementos que deseen. Más aún, pueden depositar diferentes compuestos en capas alternativas de pocos átomos de espesor. Comienzan ya a explorarse las posibilidades a que da lugar la flexibilidad de estas técnicas.

La epitaxia de haces moleculares se adivina especialmente prometedora para la fabricación de dispositivos de control que conmuten y amplifiquen señales fotónicas, de la misma forma que un transistor conmuta y amplifica las señales eléctricas. En la actualidad, la fotónica se ciñe al campo de la comunicación: las señales se generan y transmiten, pero no se procesan a gran escala. La capacidad potencial de procesamiento de información que poseería un ordenador fotónico supera con creces la de cualquier ordenador electrónico.

Cada "transistor fotónico" sería más rápido que su equivalente electrónico; además, mientras que un transistor electrónico sólo puede procesar una señal, en teoría un conmutador fotónico podría tratar varias señales a la vez, porque a través del dispositivo podrían pasar varios rayos láser sin interferirse. El reto está en desarrollar materiales que ofrezcan las propiedades ópticas deseadas y que ofrezcan, además, rendimiento comercial. De momento sólo se dispone de modelos.

La primera aplicación de los dispositivos de control fotónico se implantará probablemente en los actuales sistemas de comunicación y no en los ordenadores. Una fibra óptica puede transportar muchas señales simultáneamente, pero en ausencia de sistemas fotónicos de procesamiento de la señal su manejo resulta difícil. Para extraer o añadir una señal, la secuencia completa de impulsos se transforma en impulsos electrónicos, que se amplifican y regeneran sin ruido. A continuación se separan las diversas señales eléctricas, apartándose las que han alcanzado su destino y añadiéndole otras nuevas, que se suman a las que "están de paso". Finalmente, la secuencia combinada de impulsos eléctricos se convierte de nuevo en impulsos ópticos por medio de un láser. El proceso, técnicamente ingenioso, implica el alto coste de convertir los impulsos luminosos en eléctricos y luego otra vez en luminosos. Un sistema de procesamiento fotónico ahorraría esas codificaciones y decodificaciones, beneficiándose de ese abaratamiento todos los usuarios que compartiesen una fibra óptica de alta capacidad.

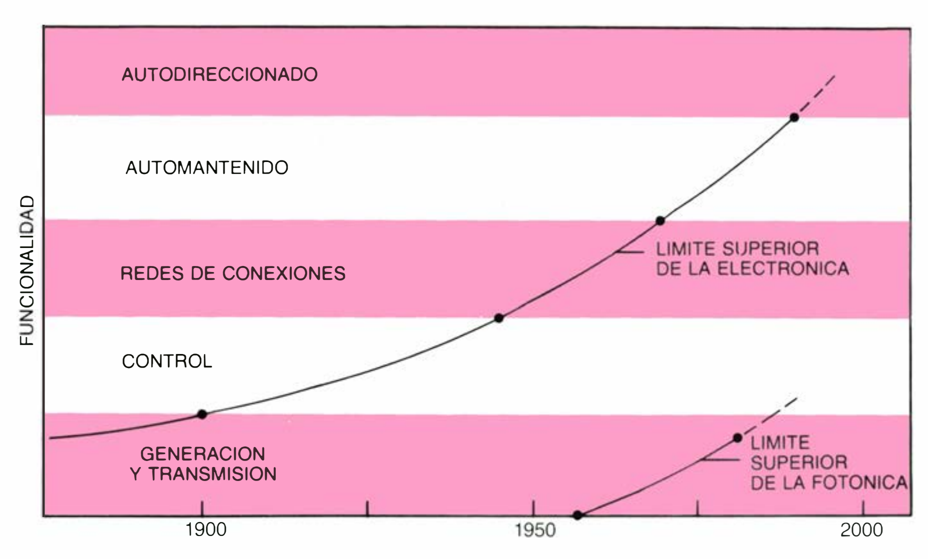
Con tales incentivos comerciales, el progreso hacia el control fotónico se prevé rápido. En la próxima década ese progreso se apoyará en los materiales conocidos, principalmente los semiconductores III-V, aunque a la vez saldrán de los laboratorios de crecimiento de cristales nuevas familias de materiales ópticos. Cuando se alcance el control fotónico resultará fácil conseguir una red de comunicaciones totalmente fotónica. Ya se están tendiendo las fibras ópticas de interconexión.



5. EL VIDRIO DESPLAZA AL COBRE como material de interconexión a medida que los enlaces fotónicos de comunicaciones desplazan a los electrónicos. La curva negra muestra la producción anual de cables de cobre para telecomunicaciones en Estados Unidos (en términos de la longitud de los conductores que forman el cable) proyectada hasta 1990. La curva de color muestra lo que habría sido la proyección sin la introducción de la fibra óptica y los sistemas de transmisión digital de alta capacidad a finales de los años 70. Entre 1970 y 1984, la industria de telecomunicaciones norteamericana consumió una media de 200.000 toneladas de cobre por año; entre 1984 y 1990 se espera que el consumo se reduzca a la mitad. La producción de cables no disminuirá proporcionalmente, ya que los cables que se seguirán utilizando serán de pequeño diámetro; el vidrio está desplazando al cobre en los niveles más altos de interconexión. Casi todos los cables de larga distancia que se tienden en la actualidad y muchos de los empleados en la ampliación de las redes de enlaces locales son ópticos. La fibra óptica también se utiliza cada vez más dentro de las máquinas electrónicas.

Centrando el tema en la potencia funcional de los sistemas de información y comunicación, he dejado de lado varias áreas de investigación que tendrán una fuerte repercusión en la fabricación de sistemas más cómodos y manejables para el usuario. El ejemplo más a mano son las pantallas. A pesar de sus ventajas, el tubo de rayos catódicos es un dispositivo voluminoso, de elevado consumo y frágil. Su principal alternativa, las pantallas de cristal líquido, suelen ofrecer dificultades a la lectura, en especial desde ciertos ángulos. Problema que se resuelve controlando cada elemento de cristal líquido de la pantalla con un transistor individual o un diodo. Tal pantalla tiene mejor contraste y permite un ángulo de visión mayor, pero su precio es más elevado.

Otra área donde queda mucho camino por recorrer son los sistemas para almacenamiento de información. Los discos y cintas magnéticas han demostrado ser los mejores dispositivos de memoria permanente, pero tienen partes rotatorias, lo que hace que consuman mucha potencia y sean voluminosos, lentos y ruidosos. Los discos ópticos, dotados también con partes rotatorias, comparten con los discos magnéticos algunos de sus inconvenientes, aunque su capacidad es mucho mayor. Lo deseable es una pastilla de memoria permanente: una pastilla que tenga la velocidad y facilidad de acceso de las actuales memorias de

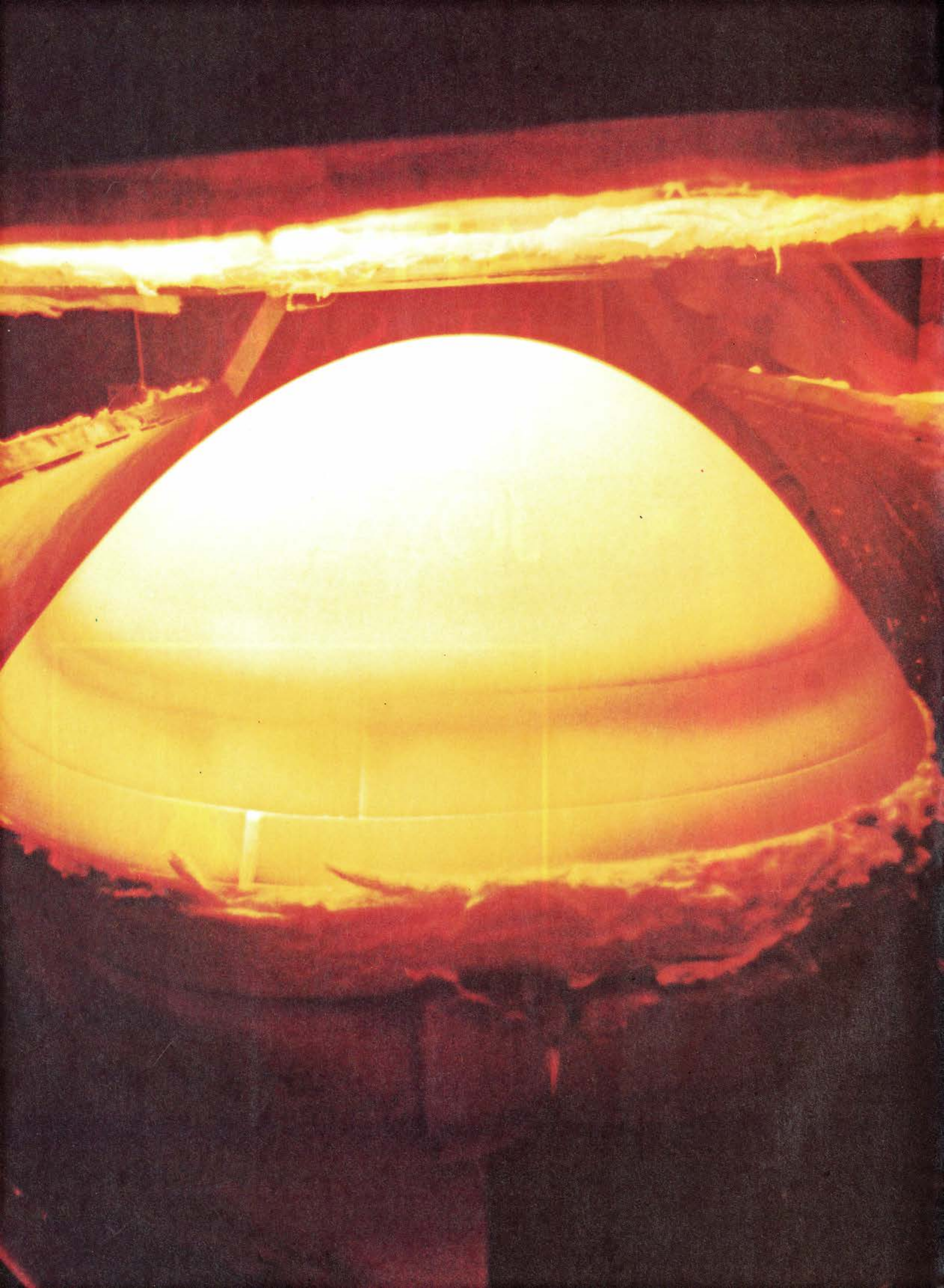


6. EVOLUCION de los sistemas electrónicos y fotónicos, que se ha caracterizado por un constante crecimiento de su funcionalidad. La generación y transmisión comercial de las señales eléctricas comenzó en el siglo XIX. Con la invención, en 1906, del tubo de vacío de tipo triodo se hizo posible el control electrónico de señales (que implica conmutar y amplificar). La invención del transistor, en 1947, posibilitó la interconexión de componentes electrónicos en redes complejas de procesamiento de información. Desde finales de los años 50, cuando se desarrollaron los circuitos integrados, la complejidad de las redes ha crecido exponencialmente. Desde mitad de los años 70, los avances en programación han permitido que algunos sistemas electrónicos se automantengan (puedan funcionar sin ser atendidos). Unos pocos se pueden caracterizar como autodireccionables (capaces de tomar decisiones inteligentes). Los sistemas fotónicos han progresado muy deprisa desde la invención del láser en 1958, pero no hay aún dispositivos capaces de controlar las señales ópticas fotónicamente. Las señales luminosas se controlan de forman electrónica, del mismo modo que en los tiempos anteriores al tubo de vacío las señales electrónicas sólo se podían conmutar mecánicamente.

acceso aleatorio (RAM) y no pierda la información almacenada cuando se corte la alimentación. Este nuevo dispositivo tendría que ser económicamente competitivo con los discos flexibles. Las pastillas de burbujas magnéticas, en las que se pensó como solución al problema de las memorias permanentes, no se han impuesto, ya que el precio de los discos ha bajado tan deprisa como el de las pastillas.

Un serio obstáculo que se opone a la espectacular evolución del tratamiento e intercambio de información es la falta de baterías adecuadas. Ese viejo problema se ha complicado con el florecimiento de la electrónica y de la tecnología fotónica: los desarrollos de diseños de baterías no han podido seguirles el paso. Los ordenadores portátiles y las emisoras de radio domésticas requieren mucha potencia, y gran parte del peso que acarrean sus usuarios corresponde al de las baterías, voluminosas, ineficaces y poco fiables. Si lo que se pretende es poner en conexión las personas con fuentes de información en cualquier momento y lugar, y no sólo cuando estén cerca de un enchufe, el desarrollo de mejores baterías debe tener prioridad en la investigación.

"¡Interconectar!": éste sería el epígrafe apropiado de nuestra era de la información; a ésta, si pensamos que las conexiones se hacen con materiales, puede llamarse también la era de la ciencia de los materiales. Nueva disciplina que ha llevado muy lejos la industria de la información y las comunicaciones, habrá de transportarla más lejos todavía: hasta un punto donde los sistemas fotónicos tengan la potencia funcional de control e interconexión de red que hoy sólo disfrutan los sistemas electrónicos. Claro que la información no es material en sí misma y la ciencia de los materiales tiene un límite. Pero una de las características más impresionantes de nuestra era es precisamente la manera armónica en que se entrelaza un mundo de objetos tangibles (de semiconductores y tarjetas de circuito impreso, de cables metálicos y fibras ópticas, de discos flexibles y pantallas de rayos catódicos) con un mundo inmaterial de datos, funciones lógicas y programas. Cuanto mayor es la funcionalidad del sistema, mayor importancia adquiere su programación. El alcanzar el más alto nivel de funcionalidad, esto es, la construcción de sistemas que sean autodireccionables e independientes de la inteligencia humana, no sólo corresponde a los científicos de materiales, es tarea también de sus colegas, los ingenieros de programación.



Materiales para la navegación aeroespacial

Los objetivos de este sector industrial relativos al vuelo subsónico, supersónico e hipersónico, así como a la exploración espacial, pasan por el uso de aleaciones y materiales híbridos de notable ligereza y resistencia mecánica y térmica

Morris A. Steinberg

A principios del año pasado, la Oficina de Ciencia y Tecnología de los Estados Unidos desarrolló un proyecto de actividades aeroespaciales para las décadas venideras. El plan establecía los objetivos a cubrir en la navegación aérea subsónica, supersónica e hipersónica transatmosférica. Estos objetivos, junto con los programas de una estación espacial propuestos por la Administración Reagan y la Iniciativa de Defensa Estratégica, constituyen un acicate para lograr sustanciales mejoras en los materiales que posibilitan a los aviones y naves espaciales un funcionamiento eficiente.

El desarrollo de los materiales, sumado a los avances en la tecnología de fabricación de cada pieza, desempeñará un papel clave en los sistemas aeroespaciales del futuro. Entre los materiales proyectados para el año 2000 entran los híbridos y nuevas aleaciones para elementos estructurales, superaleaciones, cerámicas y materiales híbridos de fibra de vidrio para los sistemas de propulsión, así como otros híbridos de carbono-carbono (fibras de carbono incluidas en una matriz de carbono) para su aplicación en zonas que soportan elevadas temperaturas donde la resistencia al calor y a la ablación es crítica.

En la fabricación de piezas y estructuras, el objetivo fundamental es la reducción de peso, incrementando así el ahorro de combustible y la distancia recorrida por dólar de combustible. (En 1980, el consumo de combustible representaba el 55 por ciento de los costes directos de explotación de una línea aérea.) Se han alcanzado grandes progresos en la fabricación de partes estructurales secundarias con materiales híbridos avanzados, llegándose a un ahorro de peso cifrado entre un 25 y un 30 por ciento. Pese a ello, queda mucho por hacer; hay que encontrar nuevos materiales más duros y al propio tiempo más fáciles de procesar, de modo que el coste de fabricación pueda rebajarse. Será también necesario desarrollar nuevos conceptos de diseño estructural con el fin de explotar el principal avance actual en la ciencia de los materiales: la creciente capacidad de sintetizar materiales para recabar propiedades específicas. Sólo de esta manera podrá llegar a cumplirse este propósito de reducir pesos y precio con el empleo de nuevos materiales.

Todas estas consideraciones se recogen en el proyecto aeroespacial elaborado por la Oficina de Ciencia y Tecnología. El primero de los objetivos de la OST (siglas con las que se designa dicho organismo) concierne al vuelo subsónico. Prevé una generación de aeronaves civiles completamente nueva. Lo más destacable de las cuales sería su eficiente consumo de combustible y un precio competitivo que facilitara el dominio del amplio mercado internacional de la aviación subsónica civil.

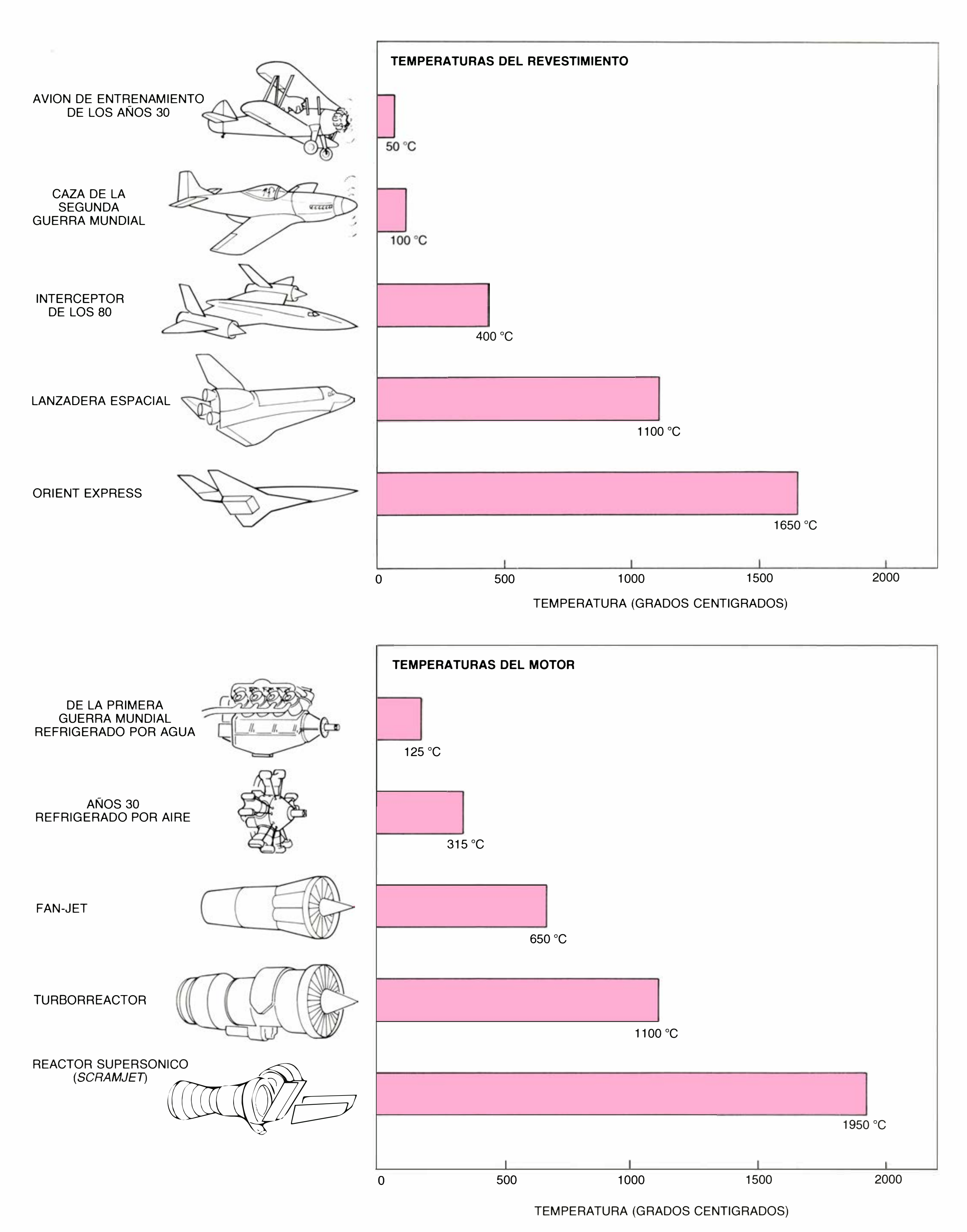
En el campo del vuelo supersónico la OST se propone la operatividad a largas distancias. Se pretende llegar a un avión capaz de volar miles de millas a velocidades de crucero supersónicas. Tales aeronaves "unirán los Estados Unidos con los más alejados lugares del Extremo Oriente". También aumentarán la capacidad de la aviación militar para llevar a cabo misiones a grandes distancias y permitirá situar sus bases en lugares alejados.

En cuanto al vuelo transatmosférico, se aspira a desarrollar aparatos que despeguen y aterricen en las pistas acostumbradas y volar no sólo en la atmósfera, sino también en el espacio exterior con facilidad de maniobra dentro y fuera de cada uno de los dos medios. Tratándose de naves que no existen, se impone comenzar por la investigación. El presidente Reagan destacó los objetivos fijados para el vuelo transatmosférico en su discurso sobre el estado de la Unión en 1986, a raíz del cual se bautizó a la futura aeronave con el nombre de "Orient Express", por las posibilidades que ofrece para transportar pasajeros desde la costa oeste norteamericana hasta Asia en dos horas o menos.

Durante los últimos años ha comenzado con empuje la búsqueda de los materiales que se necesitan para alcanzar los objetivos de la OST. En estos años se han producido notables avances en dos campos: la síntesis de nuevos materiales y el empleo de nuevos híbridos ("composites") en estructuras aeroespaciales.

Se ha dado un importante paso hacia adelante con la preparación de nuevas aleaciones mediante la denominada técnica de solidificación rápida (RST para los ingenieros de materiales). La clave es un enfriamiento extremadamente rápido del material desde una fase inicial líquida hasta alcanzar la fase sólida en forma de polvo. La velocidad de enfriamiento puede superar el millón de grados por segundo. Con este

1. CONO DEL MORRO de la lanzadera espacial. Ejemplifica el uso de materiales avanzados en la aeronavegación. El cono está hecho de un material híbrido carbono-carbono "recuperable"; éste consiste en varias capas de un tejido de fibra de grafito incluido en una matriz de carbono y un revestimiento de carburo de silicio. Resiste el calor desprendido cuando el vehículo entra de nuevo en la atmósfera terrestre. El cono del morro acaba de superar una prueba en un horno en que la temperatura alcanzó 1290 grados Celsius.



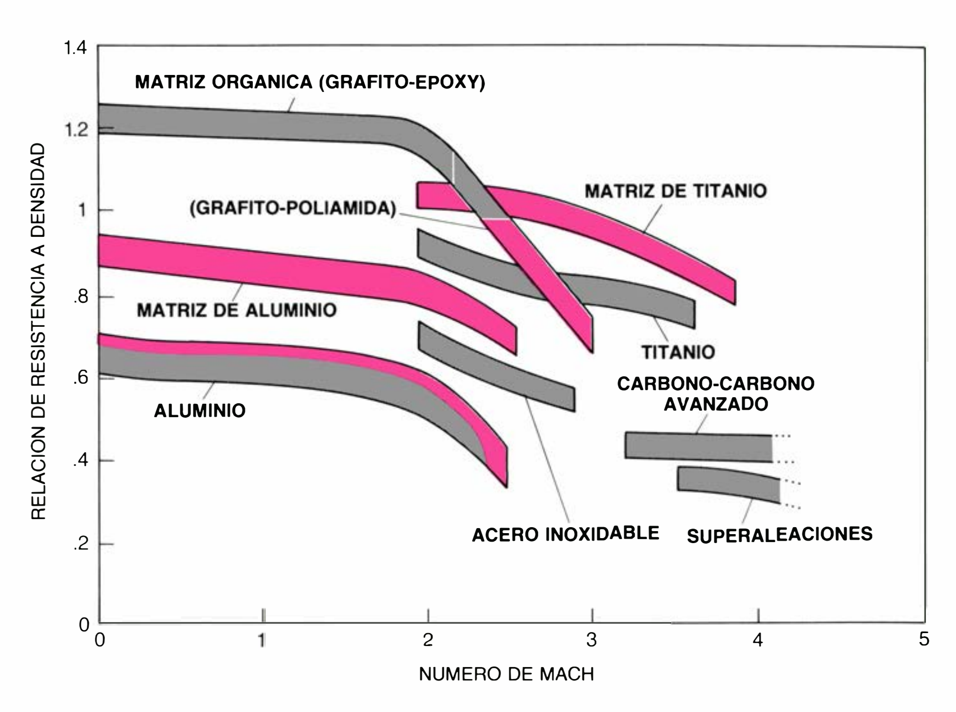
2. EVOLUCION DE LAS AERONAVES con las obligadas mejoras continuas en los materiales empleados. La creciente velocidad provoca el calentamiento de los revestimientos por fricción con el aire; asimismo, la mayor potencia desarrollada eleva la temperatura del motor. Los materiales para revestimientos han avanzado desde la madera y el textil hasta las nuevas aleaciones de aluminio, níquel y titanio y los materiales híbridos de fibras de grafito y matrices poliméricas. En los motores, materiales similares han sustituido al acero y el aluminio. El Orient Express es la nave transatmosférica propuesta por el presidente Reagan para despegar desde una pista convencional, elevarse sobre la atmósfera y volar a gran velocidad en el espacio. (Los dibujos son de Hank Iken.)

proceso se consiguen aleaciones de aluminio con una resistencia y rigidez específica muy altas, así como aleaciones de aluminio o níquel con mayor resistencia a la temperatura. Una posterior mecanización no afectaría a las propiedades deseadas, por lo que se pueden aplicar técnicas convencionales para fabricar las piezas estructurales con estos materiales.

Otros nuevos conceptos que se van incorporando en el procesado y ensamblado están contribuyendo a la mejora de los materiales. Entre ellos se cuentan el conformado superplástico, la soldadura por difusión y la sinterización. Con el conformado superplástico se consiguen grandes cambios en la forma de un material en condiciones de alta temperatura y baja presión. En la soldadura por difusión, las piezas se ponen en contacto a presión y temperatura elevadas. La unión resulta de la difusión de átomos a través de las superficies sólidas puestas en contacto, sin provocar la fusión que tiene lugar en la soldadura convencional. La sinterización consiste en llevar un material en polvo hasta su forma final sin necesidad de tratamiento posterior. Se trata de comprimir el polvo en un molde de vidrio, cerámico o de acero con la forma de la pieza.

Los nuevos materiales híbridos constan de una matriz y fibras de alta resistencia incluidas en la misma, la cual puede ser una resina orgánica o bien un metal. La fibra más común es la de grafito, pero también se utilizan fibras de vidrio, boro, carburo de silicio, kevlar (una fibra orgánica) y filamentos metálicos. La matriz mantiene unido el material híbrido y facilita que éste reciba distintas formas. Gracias a la matriz es posible también diseñar el material para obtener ciertas propiedades, tales como resistencia y rigidez. Los materiales híbridos son más resistentes que el acero, más rígidos que el titanio y más ligeros que el aluminio. Además, ofrecen propiedades mecánicas únicas, como resistencia a la corrosión y a las altas temperaturas. Por estas razones revisten especial interés para las estructuras aeroespaciales avanzadas, que deben ser a un tiempo fuertes y livianas.

Otros materiales recientemente desarrollados son aleaciones de aluminio que soportan altas temperaturas, aleaciones de aluminio de baja densidad y por tanto de bajo peso, cerámicas avanzadas y aceros de alta resistencia. Los compuestos de titanio y aluminio compaginan la resistencia a altas temperaturas con una baja densidad. Las varillas rígidas de polímeros constituyen también un nuevo avance; son pequeños bastoncillos de un polímero de elevada rigidez y resistencia incorporados en una matriz polimérica tenaz.



3. NUEVOS MATERIALES usados ya o en fase de desarrollo para los vehículos aeroespaciales. Se ilustran según su resistencia para velocidades crecientes de la aeronave. Las zonas grises de las barras corresponden a los materiales en uso; y las zonas de color a los materiales que se encuentran todavía en fase de desarrollo. Para el aluminio, las partes de color representan aleaciones que mantienen su resistencia a altas temperaturas.

Una muestra de lo que ha conseguido la tecnología de materiales en la mejora de los vehículos aeroespaciales nos la puede ofrecer la evolución sufrida por los motores de reacción. Durante los últimos 30 años, el empuje desarrollado por un gran motor de reacción para un avión de transporte se ha multiplicado casi por seis, acercándose en la actualidad a los 30.000 kilogramos. Durante el mismo período, el peso del motor sólo se ha multiplicado por un factor de dos o tres. La relación empuje-peso de los motores de reacción que se están desarrollando en la actualidad para equipar a la próxima generación de aviones militares supera la razón 10:1; para el año 2000, puede aproximarse a la de 15:1.

Los álabes de las turbinas ilustran cuanto se ha hecho hasta ahora. Durante algún tiempo se fabricaron de níquel forjado. Ahora se prefieren aleaciones metálicas modeladas por fundición. En su interior pueden llevar un complejo sistema de cavidades que permita su refrigeración por aire, aumentando así la vida útil de la pala. La clave de este logro reside en el proceso conocido por "fundición con envoltura". Un molde en cera de la pieza se cubre con una capa de cerámica y se deja secar. Bajo la acción del calor la cera se funde, quedando el molde cerámico de la pieza; ésta se fabrica entonces vertiendo metal fundido en esta moldura.

Un importante avance es la solidificación direccional durante el proceso de "fundición con envoltura". Este procedimiento consiste en controlar un gradiente de temperatura y una velocidad de enfriamiento para que en la paleta aparezcan granos de cristal columnares orientados según su eje mayor. La solidificación direccional proporciona un aumento sustancial de la vida de la pala, cosa lógica si se tiene en cuenta que los fallos suelen comenzar en los bordes transversales del grano (perpendiculares al eje del álabe) y que no existen tales límites con los cristales solidificados direccionalmente.

También se han mejorado los recubrimientos de los álabes, que protegen su estructura de la oxidación, corrosión y sulfatación por el chorro de combustión. Los nuevos recubrimientos se componen de cromo, aluminio e ytrio en aleación con hierro, cobalto o níquel. Ofrecen una protección fiable hasta temperaturas de unos 1200 grados Celsius.

Con estas mejoras y algunas más en los sistemas de propulsión de las aero-

naves, resulta que su composición actualmente viene a ser de un 38 por ciento de níquel, un 28 por ciento de acero, un 22 por ciento de titanio y un 8,5 por ciento de aluminio, junto con pequeñas cantidades de materiales híbridos, cobalto y cerámicas. De continuar así esta evolución, para el año 2000 un sistema de propulsión típico contendrá probablemente alrededor de un 20 por ciento de materiales híbridos y otro tanto de acero, de níquel y de aluminio, un 15 por ciento de titanio, un 2 por ciento de aleaciones específicas (como los aluminiuros, es decir, compuestos aluminio-titanio o aluminio-níquel de una composición determinada) y un 1 por ciento de materiales cerámicos.

Para alcanzar los objetivos propuestos por la OST habrá de lograrse un progreso significativo en otros campos, además de la propulsión. Especialmente importantes serán los avances en el descubrimiento de nuevos materiales y en el procesado de los ya existentes. La nueva generación de aeronaves subsónicas necesitará materiales avanzados tanto para su estructura como para los motores, si se quieren alcanzar las metas previstas en consumo de combustible. Estos materiales deben ser mucho más fuertes, rígidos y ligeros que sus predecesores. También tendrán que proporcionar mayor resistencia a la fractura, la corrosión y las temperaturas elevadas.

El aluminio, el acero y el titanio continuarán siendo probablemente los materiales básicos en las estructuras subsónicas. Todos ellos, sin embargo, deberán mejorarse. Las aleaciones de aluminio con mayor resistencia y estabilidad a altas temperaturas se perfilan ya en el horizonte. Entretanto, se trabaja para mejorar la resistencia de las aleaciones de aluminio frente a la corrosión y la fractura.

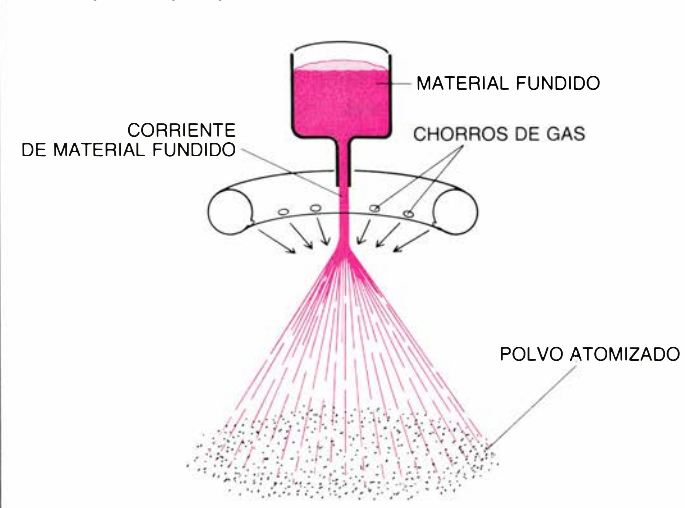
Una de las aleaciones del mayor interés es la de aluminio-litio. Su importancia radica en la baja densidad. Otras aleaciones de aluminio (como la de aluminio-hierro-molibdeno-zirconio) se comportan por debajo de los 300 grados Celsius lo bastante bien como para competir frente al titanio.

Las aleaciones del acero de la próxima generación serán más tolerantes a la fatiga y a la rotura, sin comprometer su resistencia o la facilidad de fabricación. Los materiales híbridos de matriz metálica también parecen prometedo-

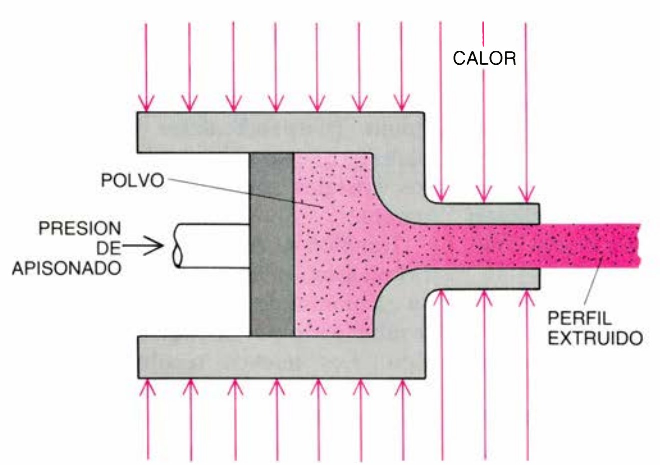
a ATOMIZACION CENTRIFUGA

MATERIAL FUNDIDO
CORRIENTE DE MATERIAL FUNDIDO
GAS REFRIGERANTE
DISCO ATOMIZADOR EN ROTACION
PARTICULAS FINAS

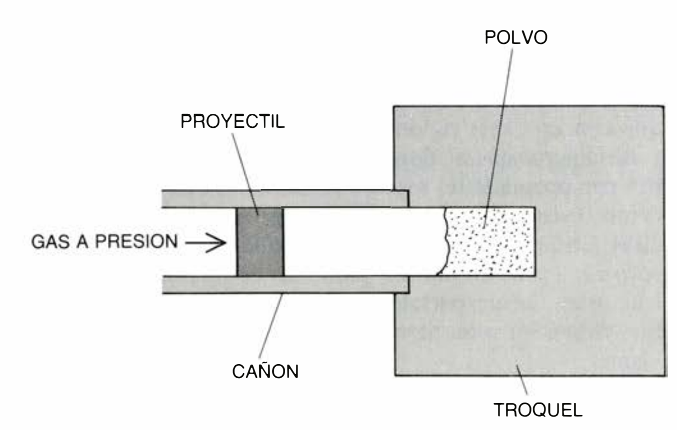
b ATOMIZACION POR GAS INERTE



c EXTRUSION EN CALIENTE



d COMPACTACION DINAMICA



4. SOLIDIFICACION RAPIDA. Proceso que rinde una aleación metálica en forma de polvo, a la que es fácil dar forma y que conserva sus características incluso cuando sufre un mecanizado posterior. Para obtener el polvo, se dirige un chorro de aleación fundida contra una rueda que gira rápidamente (*a*). Otro método para conseguirlo se basa en chorros de gas dirigidos (*b*). El polvo puede ser conformado luego mediante extrusión (*c*) o aplastándolo contra un molde de manera adecuada. En el proceso llamado de sinterización, la forma del molde es la definitiva de la pieza, que no necesitará, por tanto, mecanizado posterior.

res. Un material compuesto de fibras incorporadas en un sustrato de aluminio, por ejemplo, puede significar una gran ayuda para el diseño de la aeronave merced a su bajo peso, mayor resistencia mecánica y mayor resistencia a las temperaturas altas. Estos materiales híbridos mejorarán probablemente de manera paralela la calidad de las materias primas y los desarrollos de su proceso de fabricación. Hoy por hoy, las aleaciones de titanio deben obtenerse y manipularse a altas temperaturas. Con las futuras aleaciones podremos trabajar a temperatura ambiente gracias a los avances en la composición microestructural. Con ello se reducirá el coste de fabricación de las piezas a partir del material en bruto.

Otro hecho que está incidiendo poderosamente en el diseño de las aeronaves es el número, cada vez mayor, de elementos fabricados con materiales híbridos de matriz orgánica, tales como fibras de grafito sobre una matriz de resina. En un futuro inmediato, estos materiales híbridos avanzados pueden llegar a constituir el 40 por ciento de las piezas de los aparatos subsónicos. Una nueva tendencia apunta hacia los materiales híbridos termoplásticos, que son fibras incluidas en un plástico maleable bajo el calentamiento y que se convierte en fuerte y duro después de enfriado. Estos materiales híbridos funcionan bien bajo compresión y a altas temperaturas. Resistentes a la rotura durante la fabricación y uso, son más fáciles de reparar que otros híbridos.

Se trata, en definitiva, de disponer, en el año 2000, de un sustituto para los grandes aviones subsónicos actuales, como el Boeing 747. De hecho, el proyecto se ha presentado con la denominación formal de “transporte subsónico para el cambio de siglo”. Teniendo en cuenta los recientes avances y los previsibles en materiales y técnicas de fabricación, se puede anticipar para la nueva nave subsónica una reducción de peso de alrededor del 40 por ciento, que conducirá a un significativo ahorro de combustible. Parte de esta reducción de peso se deberá al menor tamaño: una aeronave diseñada con la mirada puesta en las propiedades de los nuevos materiales puede ser más pequeña que los actuales aviones, en los que las partes fabricadas con éstos se limitan a sustituir a los elementos diseñados en un material más pesado.

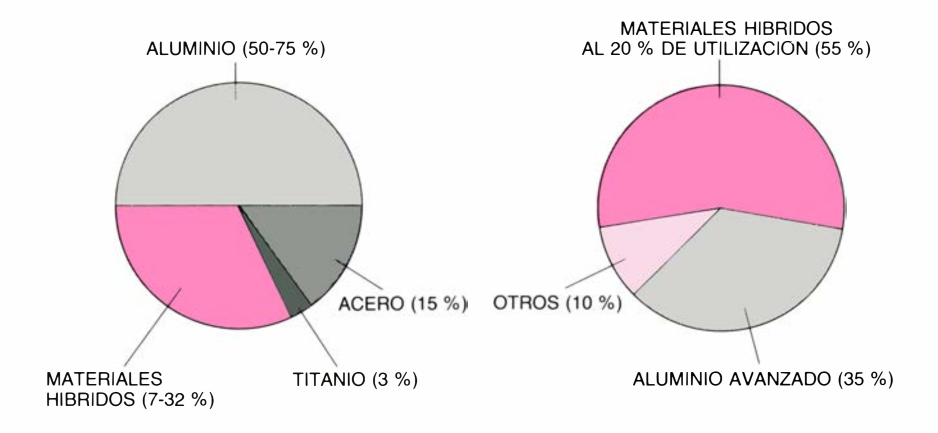
El ahorro de combustible revestirá una importancia mayor en la futura aeronave supersónica. Cada litro de combustible ahorrado en esta nave vale el doble de un litro de combustible ahorrado en una subsónica. Pero se requieren muchas otras mejoras para cubrir los objetivos que la OST ha asignado a los vehículos supersónicos. Entre éstas hay que contar avances en aerodinámica y propulsión, que dependerán, a su vez, de los avances obtenidos en los materiales.

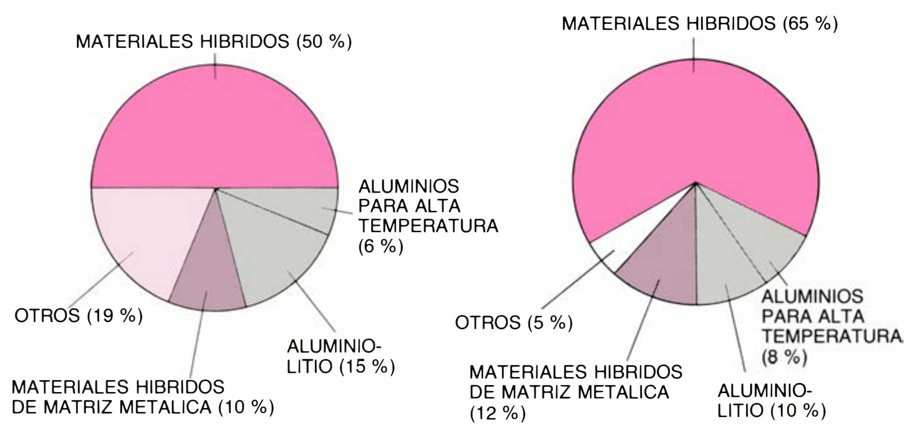
En cuanto a la aerodinámica, la principal constricción proviene de la elevada temperatura que alcanza la superficie de un avión: volando a 3,5 Mach (3,5 veces la velocidad del sonido) se aproxima a los 550 grados centígrados. Las tomas de aire, las toberas de salida de los motores y los bordes de ataque y de fuga de las alas serán zonas críticas. Se necesitarán aleaciones metálicas y materiales híbridos avanzados para soportar tales temperaturas. Es más, la mayor parte de la estructura primaria del aparato constará de estos materiales, para conseguir una buena resistencia a la temperatura, menor peso y una alta relación resistencia-densidad. Una estructura formada por dos delgadas chapas de titanio y un relleno del mismo material en forma de panal de abejas parece una buena solución para este fin.

En lo concerniente a la propulsión, el nuevo avión supersónico exigirá unos motores más livianos y de mejores prestaciones. Los compresores y cámaras de combustión tendrán que operar a temperaturas superiores a las de los actuales. Por tanto, habrá que emplear metales refractarios, compuestos intermetálicos (aluminio-titanio y aluminio-níquel entre ellos), cerámicas estructurales (carburo de silicio, nitruro de silicio e híbridos carbono-carbono) u otros materiales de esa índole.

El avión transatmosférico requerirá ulteriores avances en la tecnología de la propulsión, aerodinámica, aviónica (sistemas de control electrónicos) y materiales de larga vida para aplicaciones tanto a baja temperatura como a alta temperatura. La tecnología de la propulsión constituye el mayor reto, seguido de cerca por la tecnología de los materiales para el sistema de propulsión y la estructura.

Seguramente, la nave transatmosférica contará con un doble sistema de propulsión: estatorreactores (“ramjets”) para el vuelo atmosférico y reactores con parada de emergencia (“scramjets”) para el vuelo espacial. Un estatorreactor no reclama el pesado





5. NUEVOS MATERIALES reducirán el peso en las naves subsónicas y supersónicas en un futuro próximo. Los diagramas muestran la distribución de materiales (*izquierda*) y el ahorro de peso (*derecha*).

compresor de aire necesario en un turborreactor; a velocidades supersónicas, el aire que entra al motor se comprime por sí solo al chocar contra un obstáculo. El aire comprimido se mezcla entonces con un hidrocarburo para posibilitar la combustión. El reactor de parada de emergencia o "scramjet" trabaja de forma similar, pero quemando hidrógeno. El hidrógeno se almacena en la nave en fase líquida, extremadamente frío. El hidrógeno líquido refrigera el motor. En este proceso se calienta hasta convertirse en gas, que se utiliza como combustible. Aquí los materiales de interés son las aleaciones de níquel o cobalto, revestidas adecuadamente, que resisten altas temperaturas, y las aleaciones refractarias de niobio y molibdeno con el correspondiente revestimiento.

La estructura de la nave transatmosférica hipersónica tendrá que fabricarse con materiales fuertes, livianos y resistentes al calor. En el proyecto desarrollado por Richard N. Hadcock, de Grumman Aircraft Systems Inc., el fuselaje sería de aleaciones metálicas resistentes al calor; las alas y estabilizadores, de material híbrido carbono-carbono; tomas de aire, conductos y toberas, de materiales híbridos de matriz cerámica; tren de aterrizaje, de materiales híbridos de matriz metálica; las piezas internas, de materiales híbridos de matriz orgánica; y los herrajes, de titanio.

La tecnología concerniente a los materiales para la estructura se apoyará en la aplicación de ciertos conceptos que ya han sido puestos en práctica en la lanzadera espacial. Por ejemplo, la nueva nave espacial tendrá que soportar elevadas temperaturas externas. Se han realizado cálculos de la temperatura en varios lugares de la superficie exterior cuando el avión vuela a una velocidad de crucero de 8 Mach y a una altitud de 30.000 metros. Estas varían entre los 750 grados centígrados que alcanzaría la parte superior del fuselaje y unos 1700 en el morro.

La solución empleada en la lanzadera espacial para unas condiciones similares, como materiales híbridos carbono-carbono para el morro y los bordes de ataque, puede aplicarse a la nave transatmosférica. Este material consiste en una estructura laminar de un tejido de fibras de grafito dispuesto en capas con una matriz de carbono a modo de conglomerante y un revestimiento de carburo de silicio. Las fibras ofrecen alta resistencia y estabilidad a elevadas temperaturas; la matriz confiere las mismas propiedades; a la vez que rigidez y baja porosidad; el revestimiento impide la oxidación. Al no sufrir los efectos de la ablación, el material es reutilizable y persiste en su eficacia en posteriores vuelos. (Los ingenieros denominan a este material RCC, de carbono-carbono recuperable.) Además de un material así, las estructuras de borde de ataque en una nave transatmosférica necesitarán probablemente un sistema de refrigeración activo. Sistema que consistiría en un conjunto de conductos por los que circularía un refrigerante metálico líquido.

La carcasa externa del vehículo consistirá, posiblemente, en una estructura de tres partes. De fuera hacia dentro, los sucesivos componentes serán una capa de aleación metálica resistente al calor, otra de material aislante y una tercera capa fuerte, aunque liviana, de material híbrido orgánico.

Parte importante de la estructura la constituirán los depósitos criogénicos: sistemas de almacenamiento aislantes para mantener el combustible (hidrógeno líquido) a baja temperatura. Cabe pensar en un tanque formado por un material híbrido de matriz metálica rodeado por una capa de aislante, fabricada de espuma sintética que impida toda posible transmisión de calor.

Los satélites y misiles reclaman materiales que sean fuertes y rígidos, de baja densidad, resistentes al calor y a la dilatación a altas temperaturas, y buenos conductores del calor y la electricidad. Los materiales híbridos gozan de amplio uso en los misiles estratégicos para ahorrar peso; cada kilogramo de peso muerto ganado en los escalones superiores extiende el alcance del misil en una milla náutica. Si el cohete se fabricase con materiales híbridos de grafito, en vez de con metales, un misil agregaría 600 millas a su alcance.

Las naves espaciales de antes construíanse de aluminio, acero inoxidable, titanio, magnesio, berilio e invar (una aleación hierro-níquel notable por su bajo coeficiente de dilatación térmica). Hoy en día, la tendencia apunta hacia el empleo de materiales que proporcio-

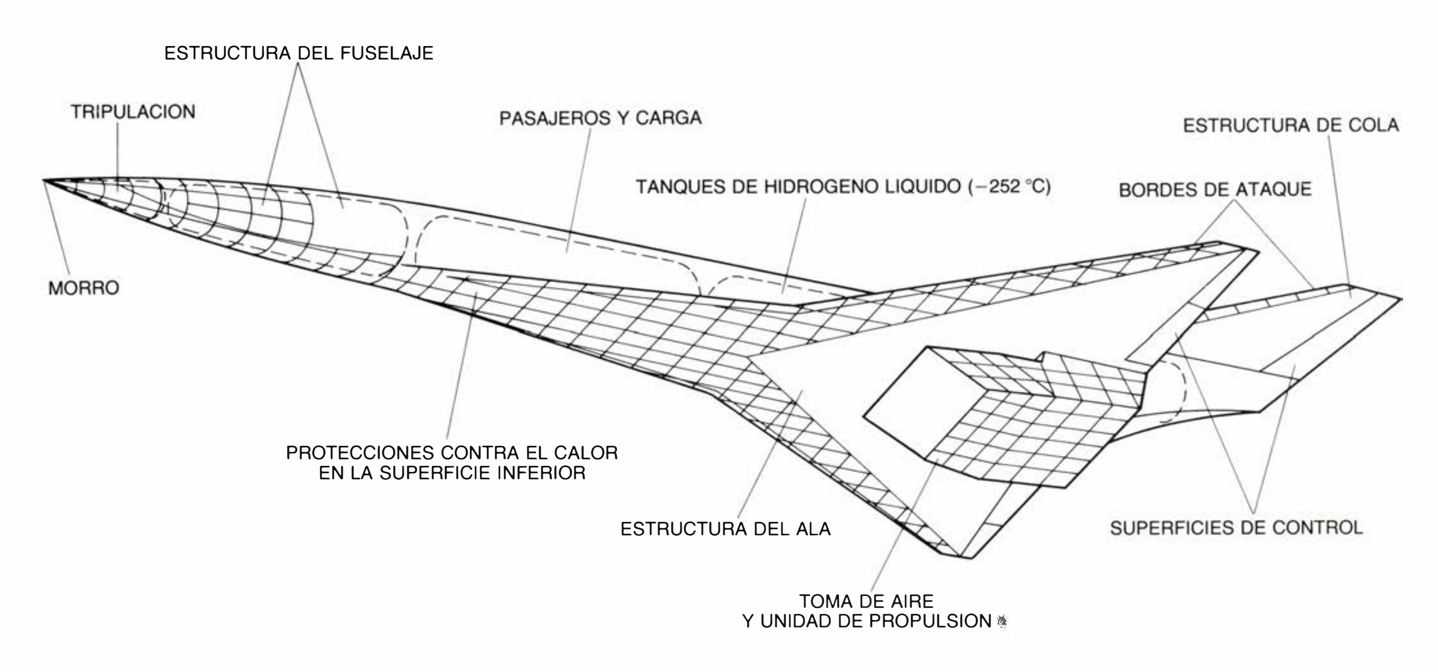
nen todavía mejores prestaciones gracias a su extraordinaria rigidez, bajo peso y estabilidad de sus dimensiones. Los materiales híbridos de matriz metálica sobresalen por esas propiedades. Entre ellos el grafito-aluminio y el grafito-magnesio destacan entre los más prometedores.

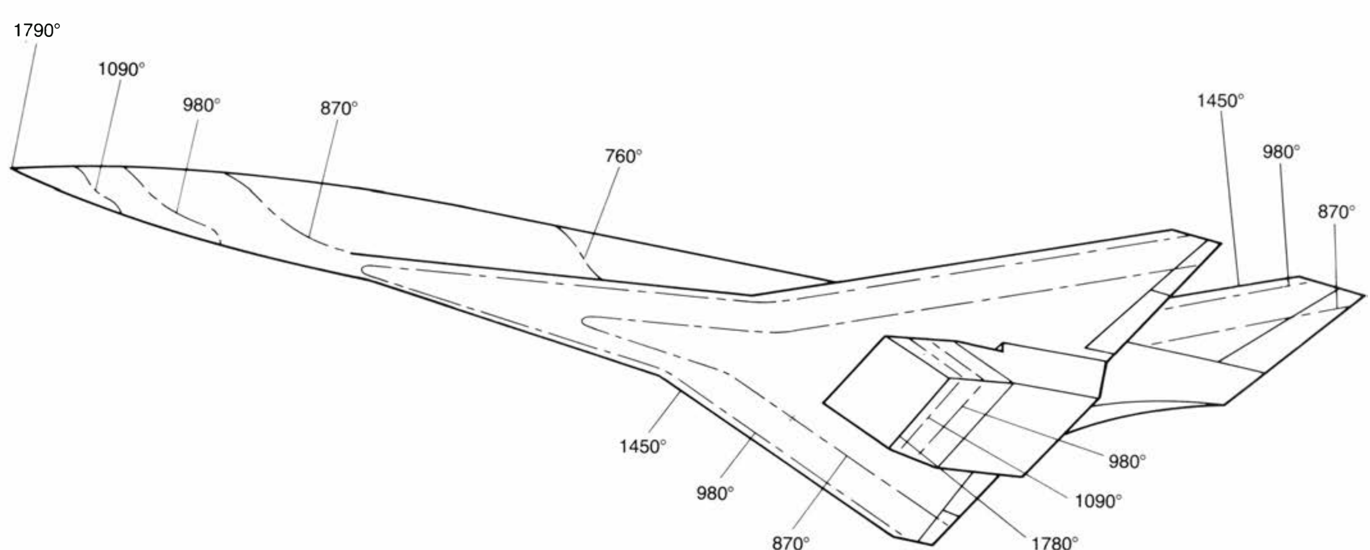
Para la proyectada estación espacial, la Administración Nacional para la Aeronáutica y el Espacio (NASA) ha propuesto que los módulos habitables sean de aluminio. Entre las razones aducidas se afirma que los materiales híbridos pueden desprender gases tóxicos en algunos casos. Además, el aluminio ofrece mayor protección contra la radiación. Para otras partes de la estación espacial (largueros y armazones), los materiales híbridos parecen ideales gracias a su tenacidad, baja densidad y elevada resistencia a la dilatación.

De la Iniciativa de Defensa Estratégica, todavía en mantillas, no puede predecirse qué materiales servirán mejor a sus propósitos. Parece probable, sin embargo, que los objetivos que se están señalando dependerán, en gran medida, de estructuras y materiales nuevos, algunos de ellos aún por descubrir quizá.

Siguiendo el curso normal de los acontecimientos, el desarrollo de un material puede tardar, desde el laboratorio hasta la cadena de producción, unos 15 años. Hay que determinar las propiedades del mismo en todos sus detalles y programar los mejores medios de fabricación a gran escala. Todo este trabajo ha de realizarse con la mirada puesta en el coste final del componente, para asegurarse de que la aeronave resulte viable.

Los retos que tiene planteados la ciencia e ingeniería de materiales se resumen en los siguientes: preparar nuevos prototipos a un precio razonable y mejorar los procesos de fabricación y montaje. Si se alcanzan estas metas, los resultados se plasmarán en una eficiente producción de aviones civiles y militares y en unos vehículos espaciales mucho mejores.





6. LA AERONAVE TRANSATMOSFERICA supone un reto para los investigadores de nuevos materiales. Volará a gran velocidad en la atmósfera y en el espacio exterior. Una posible configuración de la nave aparece en la parte superior; en la ilustración inferior se muestra una estimación de las probables temperaturas que registrarán en la superficie y en el sistema de propulsión. Se espera que la nave en cuestión cruce el océano Pacífico en menos de dos horas.

Ciencia y sociedad

De los vínculos atómicos

Se ha visto por primera vez los enlaces que unen entre sí los átomos de un sólido. El logro es obra de científicos del centro de investigación Thomas J. Watson de la IBM, sito en Yorktown Heights, Nueva York. Para lograrlo, se han valido del microscopio de barrido de efecto túnel, instrumento que permite "ver" las superficies de los sólidos, átomo a átomo.

Robert J. Hamers, Rudolf M. Tromp y Joseph E. Demuth presentan su trabajo en *Physical Review Letters*. El funcionamiento del microscopio de efecto túnel es singular. Se aplica una diferencia de potencial entre la muestra sometida a observación y el vértice de una sonda. Al aproximarse la sonda hasta unos pocos diámetros atómicos de la superficie, los electrones "se fugan", es decir, saltan a través del espacio de separación; eso es lo que se conoce por "efecto túnel", que es un fenómeno cuántico, consecuencia directa de que las partículas se comportan como ondas y, por tanto, sus posiciones espaciales están diluidas.

El flujo de electrones, que se registra en forma de corriente, es muy sensible a la distancia que separa la superficie y el vértice de la sonda. Para observar la superficie atómica, muy irregular, la sonda va aproximándose y alejándose de la muestra. Se ajusta continuamente la separación del vértice a fin de mantener constante la intensidad de la corriente; se guarda registro de los cambios de altura, a partir de los cuales se cartografiará el mapa de los átomos superficiales.

Para localizar los enlaces atómicos, el equipo de IBM interrumpía periódicamente el protocolo de rastreo, mantenía la sonda quieta y modificaba el voltaje aplicado. A partir de las mediciones de los cambios que registraba la intensidad de la corriente se elaboró un mapa que recogía la localización de los enlaces de los átomos de superficie.

Lazos familiares

Los genes de histocompatibilidad, que controlan la capacidad del organismo para distinguir lo propio de lo ajeno, determinan que el receptor de un transplante rechace o no el tejido del donante y resultan de importancia decisiva en el combate contra las infecciones. Pruebas recientes apuntan que, en diversas especies, quizás intervengan también en el reconocimiento del parentesco.

Los últimos hallazagos débense al trabajo de Richard K. Grosberg y James F. Quinn, de la Universidad de California en Davis, quienes han demostrado que esos genes controlan probablemente el reconocimiento del parentesco en la diminuta larva planctónica de la ascidia *Botryllus schlosseri*. Demostraron en primer lugar que las larvas de *B. schlosseri* reconocían a sus parientes. *B. schlosseri*, como otros invertebrados marinos, es de hábito colonial. Se funda una colonia cuando una larva alcanza la madurez sexual y abandona la túnica sacciforme que rodea la colonia progenitora; nada hasta otra roca, o cualquier otro sustrato sólido, donde se fija y da inicio a la metamorfosis que la convertirá en un individuo esencialmente inmóvil: el zooide. El fundador se reproduce por gemación asexual, formándose una colonia de zooides genéticamente idénticos que comparten un mismo sistema de irrigación sanguínea.

Los investigadores fundaron una colonia fecundada que actuaría de madre y cuyos descendientes portarían, todos, un marcador genético de fácil identificación. Seguidamente dispusieron la colonia en el centro de un panel circular, cementada en amianto, que sumergieron en el mar; esperaron el nacimiento de larvas nuevas y registraron en un plano la localización, sobre el panel, de las colonias de *B. schlosseri* de nueva fundación. Los mapas revelaron que las larvas derivadas de la colonia madre, que eran todas ellas hermanas, se asentaban a menor distancia mutua que las que no estaban emparentadas por línea de hermandad, y que habían migrado al panel procedentes del agua circundante. Por medio de modelos matemáticos demostraron también que el arracimamiento no sólo respondía a la tendencia general a mantenerse cerca de la colonia madre, sino que a ello se sumaba una influencia independiente del reconocimiento del parentesco.

Grosberg y Quinn sospecharon que en ese reconocimiento intervenían los genes de histocompatibilidad, y ello porque sabían que el reconocimiento fundamentado en genes de histocompatibilidad constituiría un modo eficaz de distinguir a un individuo emparentado. En las ascidias, como en otras muchas especies, el acervo genético cuenta con un número extraordinario de alelos (es decir, variantes) de los genes de histocompatibilidad; es escasa la probabilidad de que dos individuos no emparentados reunidos al azar posean los mismo alelos.

Para analizar la influencia de la histocompatibilidad en el reconocimiento del parentesco, los autores añadieron larvas de las que se conocía su constitución de alelos de histocompatibilidad a placas de Petri que contenían colonias del invertebrado, cuya constitución y parentesco con las larvas eran conocidos. (En algunos casos, las larvas estaban estrechamente emparentadas a las colonias, pero se habían desarrollado intencionadamente con una constitución distinta de alelos de histocompatibilidad.) Sin que importara su grado de parentesco respecto de las colonias de las placas, las larvas que compartían un alelo de histocompatibilidad con las colonias residentes se asentaban más cerca de ellas que las larvas no histocompatibles. Dicho de otro modo, el parentesco no ejerce, por sí mismo, ningún efecto sobre los patrones de asentamiento larvario, lo que indica que la histocompatibilidad constituye probablemente un mediador decisivo en la agregación y reconocimiento entre parientes en *B. schlosseri*.

Esos resultados vienen a complementar hallazgos anteriores en el sentido de que los ratones distinguen a los individuos en razón de su histocompatibilidad: se aparean preferentemente con ejemplares cuyos alelos de histocompatibilidad difieren de los suyos, práctica que probablemente les ayude a evitar la endogamia [véase "Reconocimiento quimiosensorial de la individualidad genética", por Gary K. Beauchamp, Kunio Yamazaki y Edward A. Boyse; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1985].

primos Grosberg y Quinn sugieren que el grado de historreconocimiento intervendría seguramente también en el reconocimiento del parentesco en otros muchos organismos. No resulta descabellado pensar, aunque todavía se trata de una hipótesis sin contrastar, que el historreconocimiento actúe en el reconocimiento del parentesco (y en la consecuente cooperación) que a me-

nudo se observa en vertebrados sociales de gran movilidad, como la ardilla y los perrillos de las praderas.

Menos resfriados

Una de las infecciones víricas propias de estos meses, el resfriado común, resulta ser también de las que más se resisten al tratamiento. El organismo no desarrolla inmunidad frente al resfriado y son escasas las esperanzas de obtener una vacuna que la estimule artificialmente. El sistema inmunitario se demuestra impotente ante esa infección, por la múltiple variedad de sus agentes causales: la mayoría de los resfriados los provocan rinovirus, grupo del que se conocen al menos 100 estirpes distintas. Las regiones de la cápside (la cubierta proteica) del virus que quedan expuestas, y a las que se unen los anticuerpos, son precisamente las que varían más entre estirpes. Los anticuerpos desarrollados contra una cepa de rinovirus de nada sirven para combatir otra.

La explotación de las semejanzas menos notables que se advierten entre las estirpes sí podría ofrecer un arma contra el abanico entero de rinovirus. En 1984, Richard J. Colonno y Gordon Abraham, de la compañía Merck Sharp & Dohme, informaban que la mayoría de los rinovirus sometidos a ensayo se unían a un mismo tipo de molécula superficial en su infección de células humanas. Hallazgo que venía a apuntar que la defensa global contra los rinovirus podría aprovecharse de esa coincidencia de receptor superficial. Michael G. Rossmann, de la Universidad de Purdue, y sus colegas ofrecían una nueva posibilidad el año pasado: describieron la estructura del rinovirus en sus pormenores atómicos. La descripción, apoyada en cristalografía de rayos X, mostraba que en la base de un profundo cañón que corta todas las caras de la cápside se distinguían ciertas secuencias proteicas comunes a todas las estirpes. La angostura del canal impediría la entrada de moléculas de anticuerpo, pero fármacos antivíricos, de menor tamaño, sí podrían llegar a las secuencias comunes. Se han confirmado ya ambas posibilidades.

En un trabajo que recoge el *Journal of Virology*, y en la reunión de la Sociedad Americana de Microbiología celebrada este año, Colonno y sus colegas expusieron una estrategia para bloquear la unión del rinovirus a su principal receptor de membrana. Inyectaron en ratones membranas celulares humanas, con lo que se estimuló la síntesis, por parte de los roedores, de anticuerpos contra distintas proteínas de la superficie celular. Resultaba probable que al menos uno de los anticuerpos presentara especificidad para el receptor del rinovirus; al añadirlo a un cultivo de células humanas, ocuparía el sitio de recepción y protegería, a las células, de infecciones subsiguientes por parte del virus.

Para hallar el anticuerpo, los investigadores aislaron y cultivaron células secretoras de anticuerpo obtenidas de los ratones; luego, sometieron a ensayo la capacidad para bloquear la infección por rinovirus de todos y cada uno de los productos secretados. Dos de los 7356 cultivos celulares contenían anticuerpos que bloqueaban el receptor. En los ensayos efectuados *in vitro*, el anticuerpo evidenciaba una extraordinaria eficacia en desbaratar la estrategia vírica.

Se ha sometido ahora a ensayos *in vivo* el bloqueo del receptor. En un pequeño grupo de chimpancés (los únicos animales, humanos aparte, susceptibles de infección por parte del virus del resfriado), el tratamiento previo con el anticuerpo, administrado por vía nasal con un atomizador, inhibió el desarrollo vírico. Un estudio de voluntarios humanos, efectuado en colaboración con Jack M. Gwaltney, Jr. y Frederick G. Hayden, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Virginia, ofreció resultados igualmente alentadores. Ninguno de los voluntarios que habían recibido el anticuerpo quedó totalmente protegido de la infección, pero la aparición de los síntomas se retrasaba en ese grupo uno o días respecto de la pauta registrada en un grupo de control. Además, la severidad de los síntomas se redujo al 50 por ciento.

La estrategia de bloqueo del receptor postulada por Colonno impediría que el virus completara el primer paso de la infección: la unión a la superficie celular. Por lo general, el virus penetra entonces en la célula y se desprende de su cubierta proteica, dejando al descubierto el ARN que dirige la elaboración de nuevas partículas víricas. En trabajos recientes del grupo de Rossmann, publicados por *Science*, se apunta el método a seguir a la hora de diseñar fármacos que detengan la infección por retención del rinovirus en el interior de su cubierta proteica.

Se conoce ya una clase de compuestos experimentales que, en ensayos de laboratorio, bloquean rinovirus y virus emparentados, desnudos. Para determinar el modo de acción de esas drogas, el grupo de Purdue analizó la interacción del rinovirus con dos de las substancias: WIN 51711 y WIN 52084. Comenzóse por cristalizar el virus, paso previo a los estudios estructurales por difracción de rayos X; luego, se bañó parte de los cristales en los compuestos antivíricos.

La comparación de los datos de difracción ofrecidos por los cristales tratados con los obtenidos de los cristales de control reveló que las moléculas de los compuestos WIN se unían a sitios de enlace ubicados entre las secuencias proteicas constantes que constituían el suelo de los cañones. Un canal conduce del fondo del cañón al núcleo de ARN del virus; el compuesto WIN se aloja hacia la mitad del paso: gran parte de la molécula anida en una profunda oquedad de la pared del canal y el resto se introduce en el canal central y lo bloquea.

Esos resultados, el primer retrato atómico de la interacción de un compuesto antivírico con el propio virus, explica, de dos modos distintos, la capacidad de esos fármacos para impedir que el virus se desprenda de su cubierta. En varios virus vegetales, la muda de cubierta debe ir precedida de la entrada de iones hidrógeno en la partícula; si se requiere también ese flujo en el rinovirus, el obstáculo que supone la unión del compuesto WIN sellaría las aberturas de la cápside y explicaría el efecto estabilizador de esos productos. Por otra parte, en el proceso de muda quizá desempeñe un papel decisivo el hundimiento de la oquedad donde se acomoda la molécula WIN. El relleno del hueco por parte de la molécula WIN aseguraría la cápside e impediría su desmembramiento.

Los resultados vienen a apuntar un modelo a seguir en el diseño de nuevas drogas que interactúen con el rinovirus de modo análogo a los compuesto WIN. Conocidos el tamaño y la configuración del sitio de unión, y la naturaleza de las interacciones que se establecen con los compuestos antivíricos de muestra, podrían fabricarse a medida fármacos que encajaran en el nicho igual o mejor que los considerados. Se conoce, o se sospecha, la existencia de sitios de unión equivalentes a los de las moléculas WIN en parientes de los rinovirus: el poliovirus y el virus de la hepatitis *A*. Rossmann y sus colegas avanzan la posibilidad de un diseño racional de fármacos que hagan frente al virus del resfriado y que venzan también a sus primos más virulentos.



Materiales para el transporte terrestre

Los millones de automóviles y camiones fabricados cada año consumen cantidades ingentes de materiales. Los más empleados son, con mucho, aluminio, plástico y acero de alta resistencia

W. Dale Compton y Norman A. Gjostein

Uno de los principales factores determinantes de la vida moderna es su capacidad para facilitar el transporte rápido de personas y mercancías. La libertad de trasladarse a otra ciudad, de vivir lejos del trabajo o sencillamente de recorrer grandes distancias para ir de compras, cenar fuera de casa o salir a dar una vuelta, se apoya sobre todo en unos medios de transporte rápidos y seguros. Parte de esta necesidad la resuelven los autobuses, las redes de metro o el tren, pero se satisface sobre todo gracias al más privado de los medios de locomoción: el automóvil. En los EE.UU., cada familia cuenta, en promedio, con 1,5 automóviles o camiones; los 164 millones de vehículos matriculados recorren cada año más de tres billones de kilómetros. En el transporte de personas y bienes por carretera se consume más de una sexta parte del producto nacional bruto.

Y el resto del mundo no le va en zaga a los EE.UU. Contando todos los países del globo, hay un vehículo por cada 12 personas, que es más o menos la proporción existente en los Estados Unidos en 1920. Y a medida que se acelere la industrialización en el resto del mundo, esta relación indudablemente aumentará. La creciente demanda de automóviles se encontrará con una industria de cariz internacional. De los 42 millones de automóviles y camiones fabricados en 1984 se destinaron a la exportación más de 15 millones. Japón y EE.UU. se repartieron la fracción más importante de toda la producción; cada uno de estos países fabricó la cuarta parte aproximadamente de los 42 millones de vehículos que salieron de las líneas de montaje en 1984.

Sostener tal volumen de producción requiere cantidades ingentes de materias primas. En la fabricación de vehículos se emplean cada año unos 56 millones de toneladas de hierro, acero, aluminio, plástico y otros materiales. La importancia relativa de cada uno de ellos queda determinada por numerosos factores, algunos de los cuales han cambiado notablemente en el curso de los últimos años. Como consecuencia de tales cambios, el vehículo medio contiene actualmente muchas más microaleaciones de acero de alta resistencia, aluminio fundido y plástico reforzado con fibras que hace diez años. Y esta tendencia no da señales de ceder, sino todo lo contrario: puede que dentro de diez años el material básico en la fabricación de automóviles sea el plástico. En el motor y las transmisiones podrían emplearse cantidades relativamente importantes de magnesio, elementos cerámicos y nuevos materiales híbridos. Paralelamente al cambio en el empleo de materiales, se han producido otros no menos revolucionarios en el modo en que se diseñan y construyen los vehículos.

Las circunstancias que forzaron la reestructuración de la industria del automóvil comenzaron a hacerse sentir a finales de los años 60. Durante la década anterior, las barreras arancelarias eran práctica común y en consecuencia las exportaciones no tenían mayor interés para ninguno de los fabricantes mundiales. Esta situación empezó a modificarse con la creación de la Comunidad Económica Europea y la consiguiente reducción de trabas aduaneras en Europa occidental. Poco después, el transporte por barco de vehículos terminados comenzó a bajar de precio. Hacia finales de la década de 1960 Japón había desarrollado ya una agresiva industria automovilística orientada resueltamente hacia la exportación. Un poco más tarde, a principios de los años 70, se dejó sentir el impacto causado por el primer aumento en el precio del carburante. Al juntarse el encarecimiento del combustible con la liberalización de trabas aduaneras se abrió un mercado mundial en el que partía con una ventaja económica considerable el productor con menores costos.

En ningún otro país estos cambios se sintieron con tanta intensidad como en los EE.UU., donde el efecto del encarecimiento de los carburantes y la competencia de fabricantes japoneses, alemanes y otros se agravó a causa de los nuevos reglamentos federales conducentes a aumentar la seguridad, a reducir la emisión de contaminantes y al ahorro de carburante. Satisfacer las nuevas directrices exigió la introducción de cambios sustanciales en el producto final. La reducción del tamaño del vehículo y el empleo de materiales ligeros aligeró notablemente su peso. Como resultado de estas medidas el ahorro de combustible mejoró sensiblemente: se pasó de un promedio de casi 20 litros por cada 100 kilómetros en 1974 a unos 10 litros para recorrer la misma distancia en 1985. Se consi-

1. PARACHOQUES DE PLASTICO para el Ford Taurus fabricado en una planta de montaje en Milan (Michigan), cerca de Detroit. El Taurus es un pequeño sedán cuyos parachoques no son más que una moldura de xenoy (un nuevo polímero de elevada resistencia fabricado por General Electric Company). Aquí se ven tal como salen del equipo automatizado que inyecta el plástico en los moldes. El plástico es uno de los materiales ligeros –otros son el aluminio y el acero de alta resistencia– cuyo empleo en la fabricación de automóviles y camiones crece de día en día. Durante las dos últimas décadas ha aumentado notablemente la fracción del vehículo fabricado con materiales ligeros, en detrimento del acero ordinario o hierro colado.

guió una mayor protección contra los choques introduciendo nuevos diseños y utilizando aceros de alta resistencia. La emisión de gases de la combustión se redujo mediante un reactor químico catalítico montado en el tubo de escape del vehículo, y también corrigiendo los diseños de motor y transmisión.

En sus esfuerzos por ajustarse a las normas federales e igualar en consumo de carburante a los vehículos japoneses y alemanes, los fabricantes norteamericanos se enfrentaban con un desafío de primera magnitud. Las compañías afincadas en los países del Extremo Oriente, como Japón y Corea, tienen unos costes muy inferiores a los de sus competidores americanos. Tal disparidad se debe, por un lado, a los menores costos de la mano de obra en esos países y, por otro, a sus políticas gubernamentales, que influyen sobre el costo del capital y la rentabilidad de las inversiones. La respuesta de la industria americana ha sido amplia y tajante. Tras una radical reducción de costes, actualmente se está revisando en profundidad el proceso de diseño y fabricación de vehículos, no sólo con vistas a la competitividad en precios, sino para mejorar al mismo tiempo la calidad y fiabilidad del producto.

El diseño de un automóvil o camión es un proceso jerárquico que comienza adoptando una estrategia comercial y un plan general de producción. El primer paso es la elección del tipo de vehículo que se va a fabricar: un turismo, un vehículo deportivo, una furgoneta o cualquier otro automóvil. En la fase siguiente se seleccionan las especificaciones generales: su tamaño, peso, prestaciones, ciertos detalles de presentación (si llevará techo deslizable, por ejemplo, o tracción en las cuatro ruedas) y sus características aerodinámicas. Luego se determinan la calidad y el precio de cada vehículo. De acuerdo con la estrategia comercial elegida, el vehículo puede fabricarse con piezas y componentes totalmente nuevos, o aprovechando otros que ya se estén produciendo. En ambos casos, el punto de partida para el diseño del vehículo es un vasto conjunto de conocimientos proporcionados por la experiencia.

Una vez escogidas las especificaciones generales del vehículo, el responsable de diseño deberá detallar las particulares de cada uno de los componentes. Los cuatro primeros objetivos del diseñador son lo que en lenguaje industrial se llama geometría, montaje, precio y peso: cada pieza debe tener cabida en el espacio que se le asigna, ajustarse a las otras piezas que la rodean y ser proyectada para que pueda fabricarse dentro de los parámetros de precio y peso establecidos para cada subsistema del vehículo.

Dentro del diseño del automóvil, el de los componentes en particular es donde mayor impacto ha producido el ordenador. Los diseñadores de la mayoría de las grandes compañías automovilísticas pueden utilizar hoy en día programas de ordenador que simulan las prestaciones de un vehículo. Estos programas contienen una biblioteca informatizada de modelos de los diversos componentes. El diseñador selecciona piezas de la biblioteca con las que "ensambla" un vehículo hipotético utilizando la capacidad creadora del ordenador. Tales simulaciones permiten efectuar una prueba preliminar para saber si el vehículo va a satisfacer los objetivos previstos en cuanto a consumo, emisión de gases y peso.

La geometría, el montaje y las prestaciones funcionales son importantes criterios en el diseño de componentes. Otro factor crítico es la selección del proceso de fabricación, ya que tendrá gran repercusión en el coste y calidad de los componentes. Hasta hace poco, el diseño era un proceso lineal y la fabricación se consideraba la fase final de dicho proceso, habiéndose determinado primero la geometría y el montaje, y luego las prestaciones funcionales. El proceso lineal de diseño era muy largo, debido en parte a que las pruebas para determinar las prestaciones requerían generalmente la preparación de prototipos, y el tiempo necesario para la construcción y prueba de sucesivos prototipos prolongaba el ciclo del diseño. No era extraño que transcurrieran cinco o seis años desde la definición de las primeras especificaciones técnicas hasta que el primer vehículo salía de fábrica.

No hay duda de que el ordenador ayudará a reducir el tiempo que se requiere para completar el diseño y empezar la fase de producción. La clave

2. ESTABILIZACION DE LA PRODUCCION MUNDIAL DE VEHICULOS después de haber aumentado desde la Segunda Guerra Mundial. La línea gris de trazo continuo indica la tendencia desde 1946 hasta los primeros años de la década de los 70. Si esta tendencia se hubiera mantenido, la producción habría alcanzado la cifra de 70 millones de automóviles y camiones por año; en la actualidad dicha tasa se cifra en 42 millones de unidades. Para la fabricación de estos vehículos se emplearon 56 millones de toneladas de materiales.

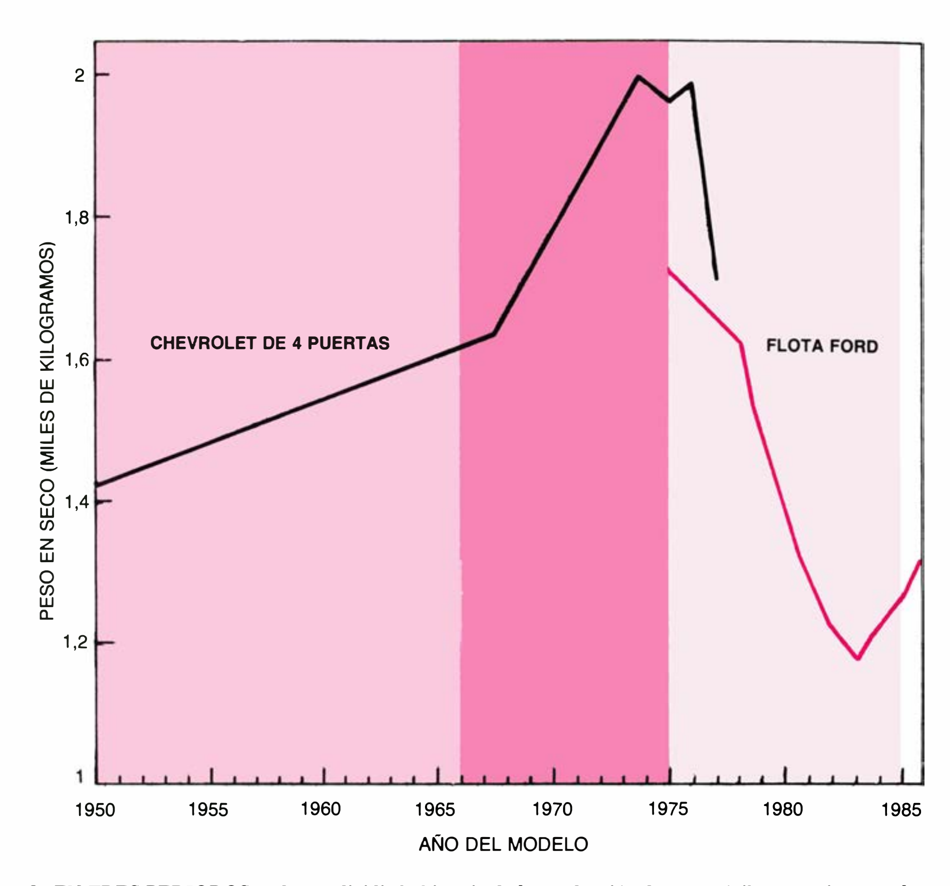
reside en la transformación del proceso de diseño, que pasará de lineal a convertirse en simultáneo, cosa que ya está comenzando a suceder. En el diseño simultáneo, el ordenador empieza por definir la geometría de cada componente y estimar la forma en que debe montarse para que encaje con las demás. Los datos geométricos se ponen a disposición de los ingenieros para que se efectúen diversos tipos de análisis al mismo tiempo. Así, el rendimiento de cada componente puede simularse con el ordenador, al mismo tiempo que se estudian en detalle las propiedades de los materiales que se emplearán en la fabricación de los componentes. Con este proceso no se necesitan tantos prototipos y se reduce el ciclo del diseño.

Por otra parte, los métodos de diseño simultáneos permiten considerar procesos de fabricación alternativos antes de que el proyecto esté demasiado avanzado. Una vez que se da forma a la pieza mediante un programa de diseño informatizado, se puede utilizar la información sobre su geometría, almacenada en el ordenador, para evaluar los posibles procesos de fabricación de esa pieza. Los datos geométricos pueden asimismo emplearse para dibujar planos técnicos, o para estudiar, hasta en sus pormenores, la viabilidad de algunos aspectos del proceso de fabricación, tales como el recorrido de las cortadoras, que posteriormente se programará en los microprocesadores de dichas máquinas.

Por importante que sea el proceso de fabricación, no puede considerarse aislado, sino que debe examinarse en función de un material determinado. Es más, las alternativas al proceso de fabricación inicial deben ponderarse teniendo siempre en cuenta los materiales que serían empleados. Por lo general, para cada componente sólo son factibles un pequeño número de combinaciones de proceso y material, en razón de las limitaciones impuestas por la forma de una pieza, su función y la integración con el resto de las piezas en el producto final. Para el bloque motor, por ejemplo, las combinaciones más socorridas se basan en el empleo de aluminio o hierro fundidos. Las carrocerías se prestan a varias combinaciones (chapado de plancha de acero, paneles de plástico moldeado y chapado de plancha de aluminio); para los cigüeñales las posibilidades se suelen reducir a dos (hierro fundido y acero forjado).

Una vez reducidas las posibilidades a las pocas que son viables, ¿cómo elige el diseñador una de ellas? El precio y la calidad son factores clave. En la estimación del coste, la influencia recíproca entre material y proceso resulta obvia, ya que ambos conceptos afectan al importe total de fabricación. El precio del material empleado en cada pieza puede calcularse de manera relativamente sencilla. Hallar el coste de fabricación supone un cálculo más complejo que comprende todas las etapas del proceso fabril. Por poner un caso: si se diseña un engranaje, todas las operaciones necesarias (forja, trabajado, tratamiento térmico, temple superficial y recocido) deben entrar en el cálculo. La razón por la que el coste del proceso se estima al mismo tiempo que el de los materiales obedece a una sencilla razón: un material de alto precio puede ser más económico de procesar que otro de menor precio, compensando o incluso invirtiendo la desventaja inicial.

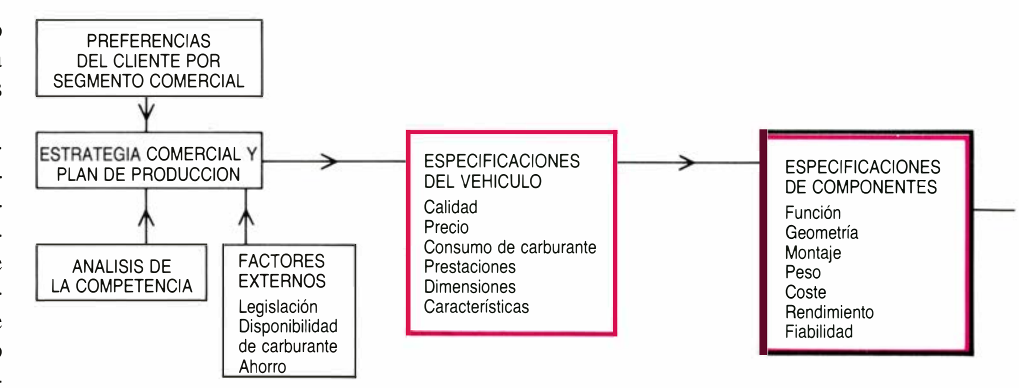
Debido a la subida del carburante, la competencia que presentan los vehículos importados de Europa y Japón, más económicos, así como la necesidad de ajustarse a las normas federales sobre consumo, el proceso de selección de materiales se ha visto fuertemente influido en los últimos años por la necesidad de reducir peso. Como consecuencia, una nueva gama de materiales ligeros ha comenzado a sustituir a los materiales convencionales con que se contaba para la industria automovilística en los EE.UU. Entre los primeros se hallan los aceros de alta resistencia, que contienen cantidades diminutas de aleaciones tales como titanio y vanadio. Los aceros microaleados pueden presentar resistencias nominales del orden de 300, 400 o incluso más de 500 millones de newton por metro cuadrado, a diferencia de los 200 que poseen típicamente los aceros dulces (convencionales). A pesar de que los aceros microaleados se conocían ya en los años 60, su producción en gran escala no comenzó hasta mediados de los 70, cuando los fabricantes americanos,



3. EN TRES PERIODOS podemos dividir la historia de la producción de automóviles y camiones en los Estados Unidos, desde el final de la Segunda Guerra Mundial hasta el momento presente. La gráfica muestra lo sucedido con el peso del automóvil de pasajeros en cada una de tales fases. La curva negra se refiere al Chevrolet medio de cuatro puertas; la curva de color, al promedio ponderado de ventas de turismos Ford vendidos en los Estados Unidos. Durante el período de posguerra, los "refinamientos" –tales como dirección asistida– dieron lugar a un aumento en el peso del vehículo aunque no en el contenido de materiales *(izquierda)*. Desde mediados de los años 60 hasta mediados de la década siguiente, nuevas normativas federales sobre seguridad y polución produjeron nuevos aumentos en peso; se introdujeron algunos materiales innovadores *(color intenso)*. Desde entonces, la competencia de los automóviles extranjeros y la subida de los carburantes hicieron que los fabricantes norteamericanos redujeran el peso del vehículo empequeñeciendo sus dimensiones y sustituyendo los materiales convencionales por otros más ligeros *(color claro)*. En los últimos años, el precio del carburante se ha abaratado y el peso del Ford medio ha comenzado a aumentar nuevamente.

buscando la manera de aligerar el peso de sus vehículos, provocaron una fuerte demanda de metales más ligeros y resistentes.

Otros materiales ligeros –especialmente el aluminio y el plástico– contribuyen también a una sustancial reducción de peso. Antes de eliminar los materiales convencionales en favor de otros más ligeros, el ingeniero debe determinar el peso que presumiblemente se ganará con la sustitución. El ahorro no puede determinarse con la mera diferencia de densidad entre los nuevos materiales ligeros y los convencionales a los que sustituyen. Hay que tener en cuenta, asimismo, cuál es la función de la pieza y qué cualidades requiere; una vez hecho esto, se comprobará que la diferencia de peso es menor de lo que pudiera parecer al considerar únicamente la densidad.



4. DISEÑO DE UN AUTOMOVIL: un proceso jerárquico que descansa cada vez más en métodos de proyectos asistidos por ordenador, o CAD *(negro)*, análisis de ingeniería y simulación, o CAE *(color)*, y análisis de fabricación, o CAM *(gris)*. El proceso se inicia con una estrategia comercial general y un plan de producción que define el tipo de vehículo y sus especificaciones generales: calidad, precio, tamaño, peso y rendimiento, entre otros. Durante esta fase se realizan simulaciones por ordenador para asegurar que diversas características técnicas del vehículo (potencia del motor y consumo de carburante, entre ellas) resulten tal y como

La comparación del aluminio fundido con un material convencional, el hierro colado, indica cómo las propiedades técnicas contribuyen a determinar cuánto peso se elimina. Uno podría creer que la sustitución de una pieza de hierro colado por otra de aluminio fundido resulta invariablemente en una considerable reducción de peso, ya que el segundo es de mucha menor densidad que el primero: un metro cúbico del material más ligero pesa un 63 por ciento menos que un volumen igual del más pesado. Sin embargo, en muchas aplicaciones técnicas el peso eliminado es mucho menor, ya que, para compensar las superiores propiedades del hierro colado, es necesario emplear un volumen mayor de aluminio. Por ejemplo, en una hipotética aplicación cuya única limitación en cuanto al diseño de los componentes sea que todos ellos posean la misma rigidez, la diferencia de peso que resulta si se emplea aluminio fundido es solamente del 11 por ciento.

Resulta todavía más sorprendente comprobar que la sustitución del acero dulce por acero de alta resistencia puede reducir el peso en algunos casos y no reducirlo en absoluto en otros. El acero de alta resistencia y el acero dulce poseen el mismo módulo de elasticidad (que es una medida crucial de rigidez). De aquí que en la fabricación de paneles para puertas, que deben satisfacer ciertas normas mínimas de rigidez, la sustitución del material acostumbrado por el acero de alta resistencia no contribuiría gran cosa a la reducción de peso. En cambio, si lo que se requiere es resistencia estructural más que rigidez (como en las bandas de las puertas laterales que protegen a los ocupantes contra posibles impactos), el empleo de acero de alta resistencia podría aportar una reducción en peso del 18 por ciento.

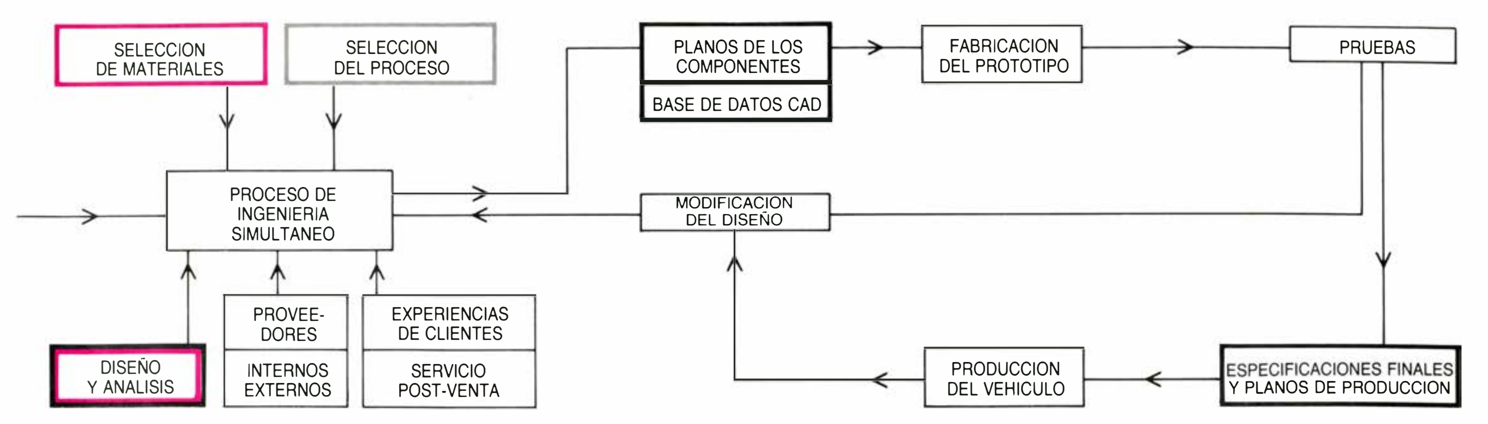
Es evidente que las propiedades físicas de un material, en el contexto específico de la ingeniería, son decisivas para determinar la cantidad de peso que puede eliminarse con la utilización de un material más ligero. No obstante, el proceso de elección del material a emplear no acaba una vez calculada la reducción de peso. Los materiales ligeros son casi siempre más costosos que aquellos a los que sustituyen. Para que su empleo sea rentable, la reducción de peso debe exceder un nivel mínimo que compense el mayor costo del material utilizado. Si juzgáramos los materiales ligeros normalmente empleados sólo por el precio, veríamos que los únicos actualmente rentables son algunos aceros de alta resistencia.

Pese a ello, otros materiales ligeros como el aluminio y el plástico están penetrando con rapidez en el mercado automovilístico. ¿Por qué? Hemos pasado por alto otro factor: si se tienen en cuenta costes de fabricación, ventajas en la integración de componentes, así como el precio de instalaciones y utillaje, estos materiales resultan también rentables. Con los adelantos introducidos en los procesos de fundición de aluminio se reducen los costes de fabricación, y así se compensa el elevado precio de la materia prima. Los plásticos ofrecen ventajas en la integración de componentes: el material es tan fácil de conformar que permite que complicados conjuntos, que de otro modo requerirían numerosas piezas de metal, puedan moldearse en un solo bloque de plástico.

Esta reflexión sobre las ventajas que conlleva el uso de metales ligeros en la industria es tan sólo un aspecto de la revisión general a la que actualmente se hallan sometidos los esquemas de producción en el sector del automóvil. El replanteamiento abarca la totalidad del proceso de fabricación de componentes, desde la manufactura del material hasta el acabado. La mayoría de los fabricantes de automóviles no han tomado parte en la primera fase de la síntesis de materiales, como sería la producción de acero. Por lo general suelen abastecerse de materiales ya confeccionados que los proveedores ofrecen en diversas presentaciones (lingotes, planchas y varillas), fabricándose ellos mismos los componentes que necesitan; otra práctica es adquirir los componentes ya preparados de sus respectivos proveedores.

El grado de dependencia que guardan los principales fabricantes de automóviles con respecto a los proveedores de piezas completas y subconjuntos ajenos a la empresa varía considerablemente de una a otra compañía. Chrysler compra un 70 por ciento de sus piezas, Ford un 50 por ciento y la General Motors tan sólo un 30 por ciento; el resto lo fabrican las mismas compañías. En el futuro, estos porcentajes podrían aumentar a medida que los fabricantes de automóviles se comprometieran en relaciones comerciales a largo plazo con sus proveedores respectivos y con otras compañías. La máxima dependencia de los proveedores externos se da cuando se compra el vehículo completo para lanzarlo luego al mercado nacional con la marca del comprador.

No obstante, la tendencia a servirse de proveedores pudiera muy pronto llegar a su límite, porque a la necesidad de reducir costes se opone el temor del fabricante a perder su diseño, su base técnica y su fabricación. Los sistemas



estaban programadas. A continuación, se diseñan los componentes individuales; en esta fase las especificaciones generales sirven de directrices. La forma de un componente queda determinada por la consideración simultánea de varios factores: función de la pieza, material de que será fabricada y limitaciones impuestas por el proceso fabril, entre varios. Otras consideraciones comprenden el montaje (forma en que una pieza encaja con otras), peso y coste. En el pasado no era posible saber con certeza cómo funcionaría una pieza hasta que no se fabricaba. Las técnicas basadas en el ordenador permiten ahora, en muchos casos, pronosticar el rendimiento antes de la fabricación. Las limitaciones o restricciones en fabricación, que antiguamente se sopesaban durante las últimas fases del proceso de diseño, constituyen hoy día una porción sustantiva del estudio técnico simultáneo.

que producen por sí mismos los fabricantes americanos de automóviles han sido por lo general los relativos a los subconjuntos principales: carrocería, motor y transmisión. Si ahora comenzaran a adquirir los componentes de estos subconjuntos principales a terceros, podrían perder su capacidad técnica para diseñar, desarrollar y fabricar productos competitivos.

Las tensiones contrapuestas que experimentan los fabricantes para decidir qué fracción de cada vehículo deben comprar y qué fracción deben fabricar son tan sólo un ejemplo de las complejas fuerzas, económicas y tecnológicas, imperantes en la industria americana del automóvil. La combinación de dichas fuerzas ha motivado alteraciones radicales en los materiales del vehículo medio de los EE.UU. en los últimos veinte años. Pero las fuerzas económicas no han actuado aisladamente. En cada fase, el efecto de las preferencias del consumidor y los cambios en tendencias comerciales han sido moderados por la legislación federal, que regula lo relativo a seguridad, emisión de gases y ahorro de combustible.

La historia de los materiales que componen los automóviles y camiones fabricados en los Estados Unidos desde la Segunda Guerra Mundial puede dividirse, a grandes rasgos, en tres períodos. En el período de la posguerra –de 1950 a 1966 aproximadamente– los turismos se fabricaban principalmente de acero dulce, que durante este período daba cuenta, en promedio, el 68 por ciento del contenido total. El hierro fundido representaba el 17 por ciento y barras aleadas de diversos tipos de acero contribuían con un 0,5 por ciento adicional. Durante el período de la posguerra el público mostraba cierta apetencia por un medio de locomoción lujoso, y los equipamientos opcionales como cambio de marchas automático, dirección asistida, servofrenos y aire acondicionado añadieron unos 100 kilogramos al peso del automóvil medio.

El período siguiente, desde 1967 hasta 1976, estuvo dominado por el efecto de la legislación federal; fue a partir de entonces cuando la normativa gubernamental comenzó a incidir de una manera significativa en el peso y contenido de materiales del automóvil medio. Las Normas Federales de Seguridad para Vehículos de Motor, promulgadas en aquel tiempo, afianzaron la protección de conductor y pasajeros, redujeron la posible intrusión de la columna del volante, aumentaron la resistencia de las puertas laterales y la capacidad de absorción de energía de los parachoques e influyeron en otros detalles del diseño de muchas piezas del automóvil. Para satisfacer las nuevas exigencias de seguridad, se añadieron nuevos componentes a los vehículos o se reforzaron los antiguos, lo que redundó en un aumento de peso. Y como el mayor peso daba al traste con el empeño de ahorrar combustible, las compañías de automóviles comenzaron a explorar nuevas técnicas para eliminar peso; entre ellas, la amplia utilización de aceros de alta resistencia.

La regulación que limitaba el volumen de contaminantes que podía emitir cada vehículo instó también el empleo de nuevos materiales, algunas veces de forma sorprendente. Por ejemplo, durante los últimos años la fracción de platino, paladio y rodio consumida por la industria del automóvil respecto al total de los EE.UU. osciló entre el 20 y el 35 por ciento. El uso cada vez mayor de estos metales preciosos y semipreciosos, procedentes en su mayoría de Africa del Sur, es resultado directo de la legislación promulgada para proteger el medio ambiente. Más concretamente, la Ley sobre Contaminación Atmosférica de 1970 impuso límites a la emisión de hidrocarburos, óxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas contaminantes en los escapes de los automóviles. La respuesta técnica de la industria fue instalar un reactor químico –un convertidor catalítico– en el tubo de escape de todos los vehículos nuevos.

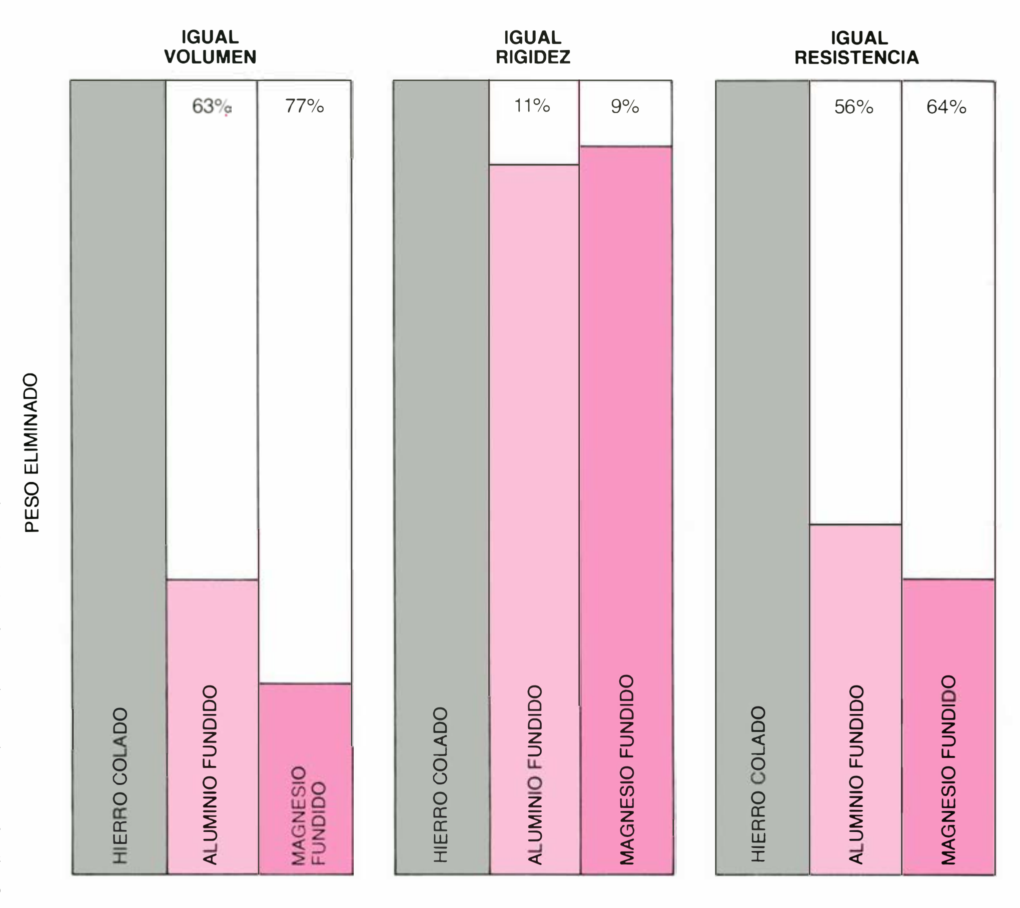
En 1977 se promulgó una nueva Ley sobre Contaminación Atmosférica más rigurosa que la anterior, lo que dio lugar al desarrollo de sistemas más refinados aún para el tratamiento de los gases resultantes de la combustión. Los nuevos sistemas comprendían un catalizador con proporciones cuidadosamente ajustadas de ciertos metales nobles (especialmente platino y rodio), un sensor para medir el contenido en oxígeno de los gases de desecho y un módulo electrónico para controlar la mezcla de combustible y aire en el motor. La cantidad de metales nobles empleados en la fabricación de convertidores catalíticos ha aumentado con rapidez, conjuntamente con la de otros dos materiales: uno es la cerámica y el otro un tipo de acero inoxidable de alta calidad, el denominado 409 por la Sociedad de Ingenieros del Automóvil. El compuesto cerámico, moldeado en forma de panal, aloja los metales nobles y con el acero inoxidable se hace el recipiente del convertidor en el que se encuentra el reactor.

Los reglamentos federales afectaron no solamente al material con que se fabricaba el convertidor catalítico, sino también al peso total del vehículo. De 1967 a 1976 el vehículo estadounidense medio aumentó de peso en unos 350 kilogramos y este aumento, combinado con la acción de los reactores químicos impuestos por las leyes regu-

ladoras de emisión de contaminantes, condujo a una drástica reducción en el ahorro de combustible. Sin embargo, la tendencia se invirtió poco después a raíz de otras regulaciones federales y el cambio de las fuerzas del mercado.

El impacto del aumento en el precio del petróleo conmocionó a la industria americana en 1974, dando lugar a un poderoso estímulo para fomentar el ahorro de combustible. Al año siguiente se promulgó la Ley de Política Energética y Conservación. Dicha norma obligaba a mejorar anualmente el promedio de consumo de combustible en los vehículos producidos por cada fabricante. En 1985, el promedio de consumo de carburante alcanzado por la flota automovilística (conocido por las siglas inglesas CAFE) llegó a 9,2 litros cada 100 kilómetros. Los incrementos graduales del CAFE, aunados a la creciente demanda de vehículos ahorradores de combustible, condujeron a un esfuerzo conjunto de toda la industria tendente a la economía de carburante, lo que se conseguiría en parte reduciendo el peso del vehículo. Entre 1975 y 1983 el peso promediado de los turismos Ford descendió unos 550 kilogramos, alcanzando los 1.185 kilogramos al final del mencionado período. El grueso de tal reducción –aproximadamente el 78 por ciento– se puede atribuir al menor tamaño del vehículo; el resto se consiguió gracias a la utilización de materiales ligeros.

Si bien podría parecer que la sustitución de materiales desempeñó un papel relativamente secundario en la reducción del peso, la realidad es que los materiales que componían el turismo medio habían sufrido, hacia mediados de la presente década, una asombrosa transformación. Si en los años 50 el 65 por ciento en peso de un Ford medio lo constituía la chapa de acero dulce, en 1985 tal fracción había bajado a la mitad. El empleo del hierro fundido se redujo en números redondos de un 16 por ciento al 13 por ciento. En vez de estos materiales convencionales se recurrió al aluminio fundido (cuyo empleo aumentó del 2 al 6 por ciento, casi todo en sustitución del hierro fundido), plásticos (que pasaron de una proporción ínfima al 9 por ciento aproximadamente) y acero de alta resistencia, que, aunque ignorado en 1950, diez años más tarde representaba aproximadamente un 10 por ciento en peso del turismo medio. Como resultado de todo esto, el contenido total en materiales ligeros de un Ford típico ascendió del 9 por ciento en 1975 a más del 23 por ciento diez años más tarde.



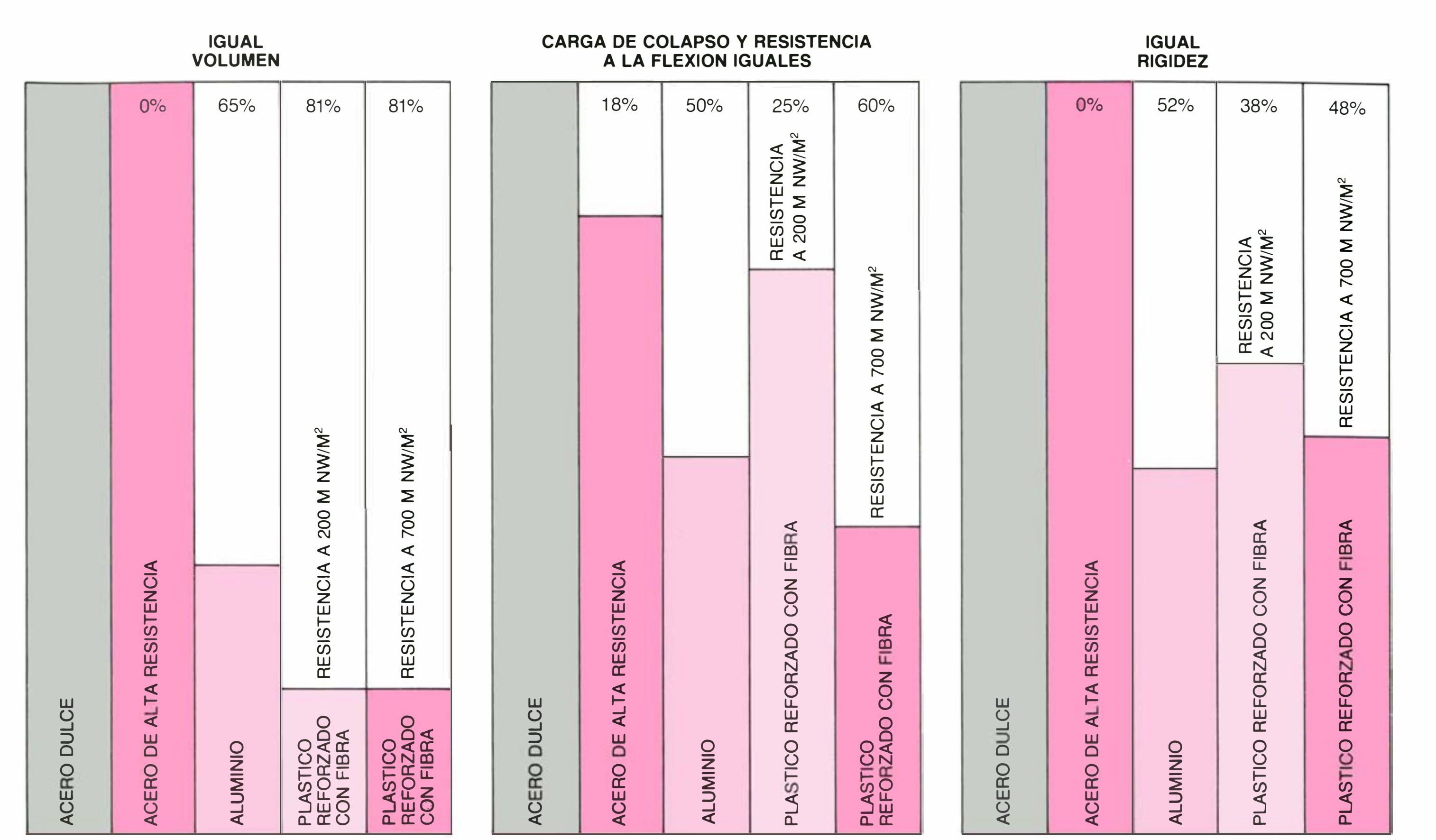
5. REDUCCION EN PESO alcanzable gracias al diseño de una pieza sustituyendo un material convencional por otro más ligero. Dicha mengua depende decisivamente de la función de la pieza. Una unidad de volumen fabricada de aluminio fundido pesa un 65 por ciento menos que un volumen igual de hierro colado. No obstante, este último es más rígido que el aluminio fundido. En consecuencia, para que una hipotética pieza de aluminio fundido sea tan rígida como otra de hierro colado, habría que emplear más aluminio y el peso eliminado quedaría reducido a un 11 por ciento. Si se quiere que la pieza de aluminio tenga la misma resis-

¿Continuarán tales cambios al rápido ritmo actual? Aunque a la vista de la magnitud de la crisis atravesada por la industria en las dos últimas décadas es difícil adivinarlo, todo parece indicar que en el futuro se pondrá menos esfuerzo para reducir el peso del vehículo. El precio del carburante ha bajado en los dos últimos años y los clientes han comenzado a comprar otra vez vehículos de mayor tamaño. El efecto acumulativo del cambio en las preferencias del público ha hecho que el promedio de peso de los turismos Ford haya vuelto a aumentar (sobre base ponderada de ventas) unos 140 kilogramos desde que alcanzó el mínimo de 1185 kilogramos en 1983.

Aun así no debe suponerse que la reducción de peso y coste haya dejado de ser un objetivo primordial para la industria del automóvil. Continúa la investigación para encontrar la manera de aligerar el peso de los distintos componentes. Por ejemplo, varios fabricantes están ensayando actualmente el empleo del titanio en los muelles de suspensión, las válvulas de escape y los resortes de válvulas. Y aunque el titanio es un material caro, con él se consigue menguar el peso en un 60 por ciento con respecto al acero. Además, las piezas de titanio del motor no se desgastan tanto con la fricción (mejorándose el consumo de carburante) y se reducen las trepidaciones (con lo cual el motor tiene más suavidad).

Si el objetivo de reducir el peso del vehículo ya no es el factor dominante en la industria del automóvil, ¿cuál es ahora? Varios factores quizá se igualan en importancia a la reducción de peso. Entre éstos se cuentan la tendencia hacia la diversificación del mercado en más segmentos, lo que conlleva la necesidad de diversificar los productos, y la tendencia mundial de recurrir a proveedores ajenos para la adquisición de componentes. Pero lo que posiblemente sea más significativo aún es la necesidad de competir con los japoneses tanto en calidad como en precio. La industria nacional del automóvil ha mejorado la calidad de sus productos en los últimos años, aunque cabe esperar aún posteriores mejoras, y esta tendencia afectará sin duda a los materiales con los que se fabrican los turismos.

Las medidas adoptadas para prote-



tencia, el peso eliminado sería un 56 por ciento. (En situaciones reales de diseño, las posibilidades de eliminación de peso por el empleo de aluminio en sustitución de hierro colado varían entre el 35 y el 60 por ciento.) De igual modo, el aluminio y los plásticos reforzados con fibra son mucho más ligeros, en términos de volumen, que el acero dulce ordinario. La economía de peso es, no obstante, mucho menor si se busca igual rigidez, o igual carga de colapso y resistencia a la flexión (una medida de la resistencia estructural). En términos de volumen, el acero de alta resistencia no es más ligero ni más rígido que el acero dulce. Ahora bien, allí donde la resistencia estructural es la necesidad principal, el acero de alta resistencia permite ahorrar peso: 18 por ciento en este ejemplo. Los supuestos de la ilustración fueron estudiados por Christopher L. Magee, de la Ford Motor Company.

ger la carrocería contra la corrosión sirven de ejemplo para ilustrar cómo puede afectar a los materiales constituyentes el esfuerzo realizado por mejorar la calidad. Durante los últimos años, la cantidad de sal esparcida en los firmes de los países fríos del norte ha aumentado considerablemente, con lo que las carrocerías de los automóviles están sometidas a un peligro de corrosión mucho mayor que diez años atrás. Para mejorar la resistencia a la corrosión, los fabricantes han comenzado a sustituir la chapa de acero dulce de la carrocería por aceros recubiertos de cinc. Estos aceros tratados constituyen un 10 por ciento aproximadamente del peso en seco del Ford medio. En efecto, el vehículo medio lleva unos 4,5 kilogramos de cinc en las capas de revestido, esperándose que esta cifra se doble en cinco años. Asimismo, la cantidad de acero inoxidable empleada en el tubo de escape probablemente continuará aumentando como medida de protección contra la corrosión.

La fracción del vehículo fabricada de plástico aumentará también, debido por una parte a razones de calidad y por otra a la necesidad de ajustar las características de ciertos productos a las exigencias de pequeños segmentos del mercado. Además de ofrecer una excelente protección contra la corrosión, el plástico tiene otras ventajas de índole económica. La maquinaria necesaria para fabricar piezas de plástico es más barata que si se fabrican de acero y puede transformarse con facilidad para satisfacer un nuevo estilo. Como consecuencia de estas ventajas, algunos industriales predicen que en los próximos años el empleo del plástico se generalizará tanto en las carrocerías como en otras estructuras. Se ha pronosticado que para 1990 cada año saldrán al mercado 1,6 millones de vehículos con la carrocería exclusivamente de plástico.

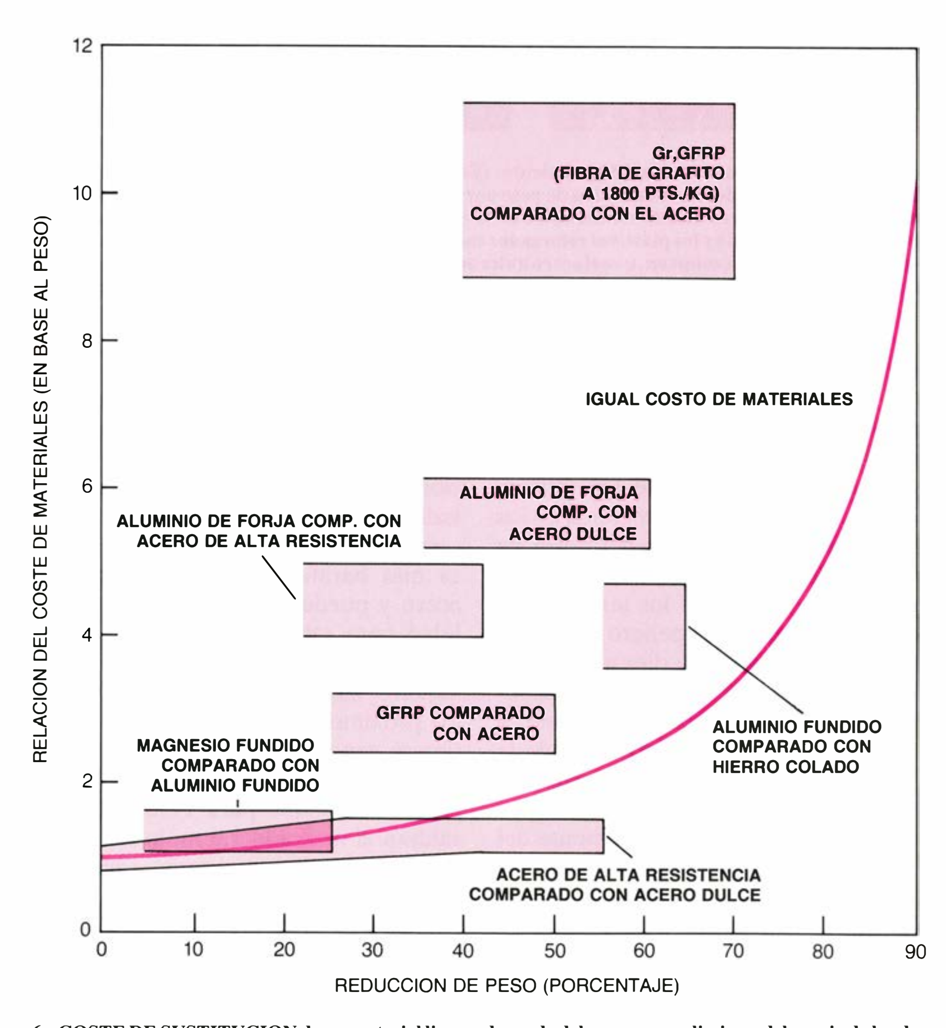
Para que tales predicciones se conviertan en realidad las investigaciones sobre plásticos actualmente en curso tendrán que mantenerse a un ritmo enérgico. La industria del automóvil presta gran atención a dos tipos de plástico diferentes: el reforzado con fibras de vidrio y el térmico flexible. El empleo del plástico reforzado con fibras de vidrio se anuncia muy prometedor en la fabricación de componentes que tengan que soportar cargas pesadas. El plástico térmico flexible puede moldearse en paneles para carrocería; una pequeña flexibilidad contribuye a minimizar los desperfectos en caso de pequeñas colisiones. De acuerdo con las pruebas de integración estructural y seguridad realizadas, la carrocería de plástico es factible, por lo que los proyectos que hoy parecen lejanos pueden muy bien verse cumplidos.

El estudio actual acerca de los plásticos se inscribe en el esfuerzo de desarrollo que a los materiales específicos dedica la industria del automóvil. Gran parte de este esfuerzo está consagrado a la cerámica, añadida a otros materiales o sola. Las partículas o fibras de cerámica pueden esparcirse sobre una base metálica, generalmente de aluminio o magnesio, formando los así llamados materiales híbridos de la matriz metálica. Tales compuestos, consistentes y rígidos, muestran una considerable resistencia al desgaste; actualmente se efectúan pruebas y ensayos para conocer sus posibilidades de aplicación en los motores y otros componentes.

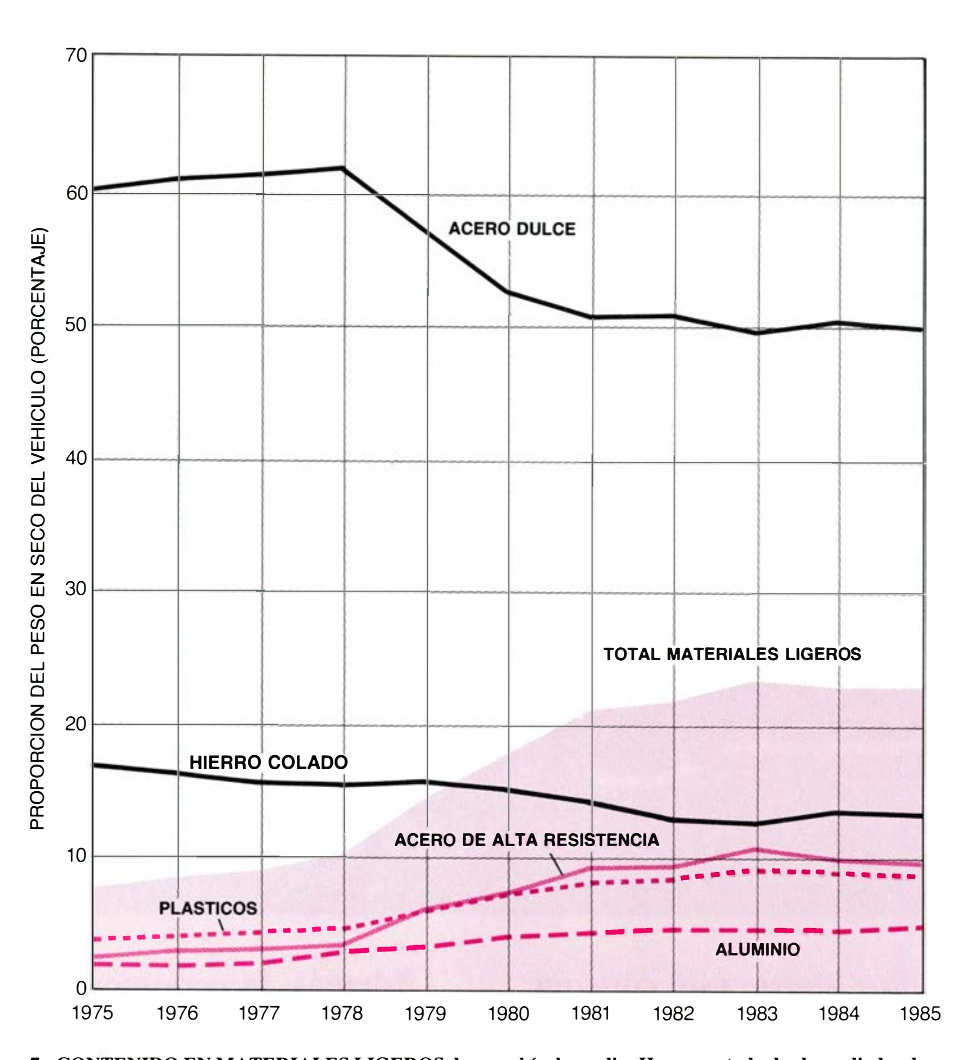
Las cerámicas revisten interés por su baja densidad, baja conductividad térmica (lo que les permite aislar zonas de alta temperatura) y resistencia a las temperaturas altas. En numerosos países, entre ellos Estados Unidos y Japón, se baraja seriamente la posibilidad de introducir componentes de cerámica en motores diesel y de gasolina. En los motores de gasolina, los componentes cerámicos comienzan a hacer acto de presencia en los turbocompresores; en los motores diesel se incorporan en las bujías incandescentes y en los dispositivos de encendido. Y además, la eficiencia de los motores diesel puede mejorarse aislando la cámara de combustión con cerámica.

Es muy probable que en la próxima década se generalice el uso de componentes de cerámica en la fabricación de motores diesel y de gasolina. A la larga, los productos cerámicos podrían constituir el principal componente de un revolucionario e innovador bloque motor para automóviles. El Departamento de Energía y la NASA (Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio) han patrocinado un programa para el desarrollo de una avanzada turbina de gas para automóvil. Se han otorgado contratos a dos grupos que compiten entre sí: uno a Ford y a su compañía filial Garrett AiResearch Manufacturing Company y el otro a la General Motors. El principal objetivo de este programa de desarrollo es construir una tobera no muy complicada por la que fluyan los gases calientes de la turbina, que pueden alcanzar una temperatura de 1370 grados Celsius. Está ya en fase de experimentación el empleo de componentes avanzados de cerámica de nitruro de silicio en las piezas que forman dicha tobera.

Aun cuando los componentes electrónicos y magnéticos tienen una importancia menor en lo relativo al peso,



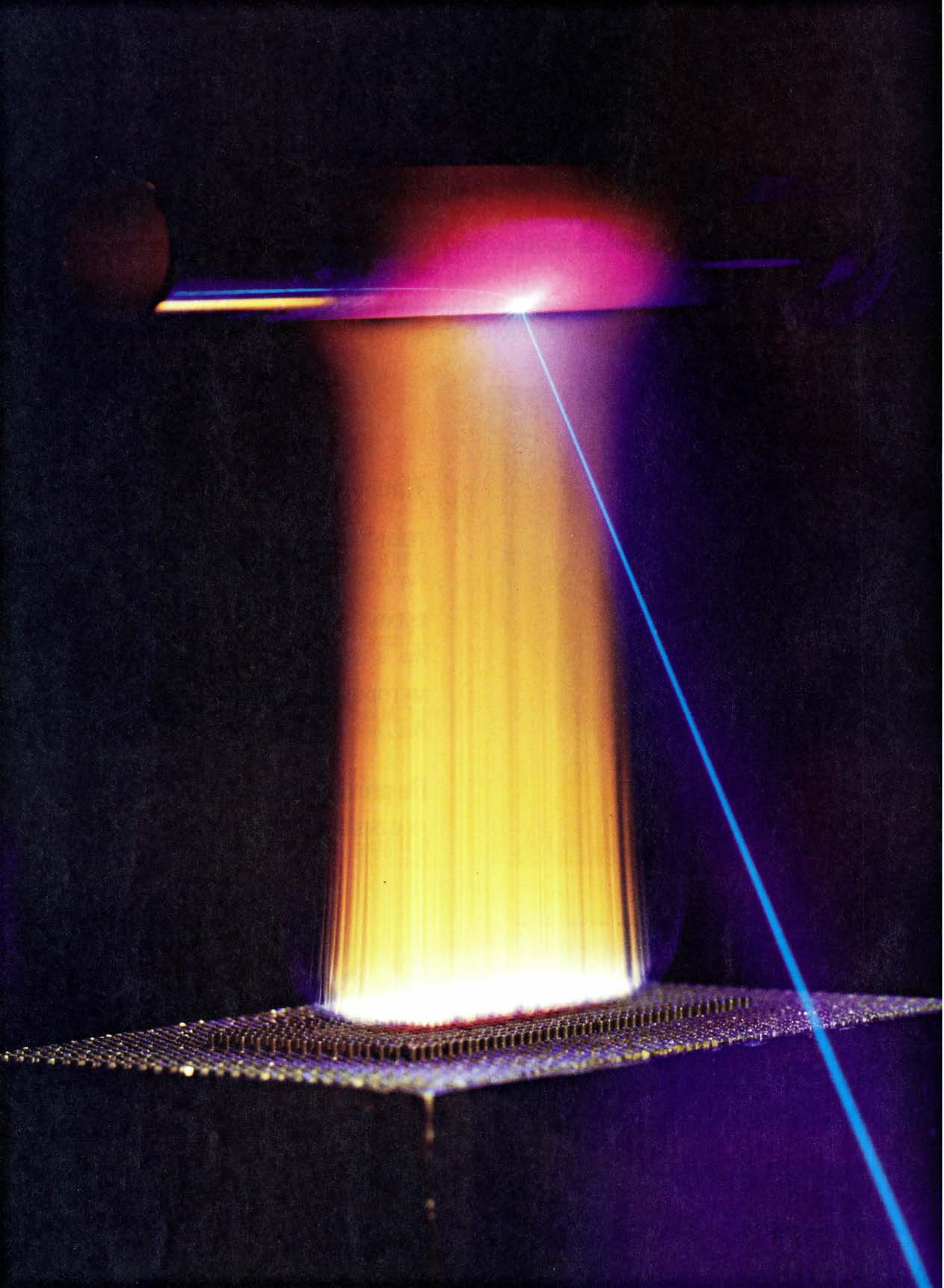
6. COSTE DE SUSTITUCION de un material ligero: depende del peso que se elimine y del precio de los dos materiales. El eje horizontal indica la reducción en peso que hace posible cada sustitución; el eje vertical representa el coste del material ligero en relación con el material convencional que sustituye (GFRP es plástico reforzado con fibra de vidrio; GR, GFRP es plástico reforzado con fibras de grafito y vidrio; los datos de dicho material suponen que la fibra de grafito tiene un precio de 1800 ptas. por kilogramo, un tercio de su precio actual). En ciertas sustituciones, los dos materiales serán de igual costo (*línea de color*). La mayoría de los materiales ligeros no ha alcanzado aún el umbral de rentabilidad, con la excepción del acero de alta resistencia. El ahorro en el procesado y montaje de los materiales ligeros compensa el costo del material.



7. CONTENIDO EN MATERIALES LIGEROS de un vehículo medio. Ha aumentado desde mediados de los años 70. Los datos se refieren a un promedio ponderado de ventas de turismos en los EE.UU. Los plásticos, el aluminio y el acero de alta resistencia vienen a representar hoy la cuarta parte del peso del material en seco de un turismo Ford. Estos materiales ligeros comenzaron a sustituir al hierro fundido y al acero dulce hace unos diez años. Los fabricantes se enfrentaban entonces al aumento de peso resultante de la tecnología adoptada para cumplir las normas seguridad y emisión de gases, así como al coste del carburante. En respuesta, se esforzaron por reducir el tamaño de los vehículos y aumentar su contenido en materiales ligeros.

desempeñan una función cada día más destacada en el progreso del nivel tecnológico de turismos y camiones. En el futuro, todos los subsistemas principales del vehículo (motor, transmisión, suspensión y dirección) se controlarán electrónicamente, y se hará todo lo posible para integrar todos los sistemas electrónicos de control en un solo sistema unificado. En los vehículos del futuro podrán aparecer nuevos dispositivos magnéticos y electrónicos: sensores inteligentes hechos de silicio y componentes optoelectrónicos, transmisores de radar de arseniuro de galio, semiconductores amorfos, nuevos materiales de cristal líquido para el panel de instrumentos y materiales magnéticos rápidamente solidificados.

Una visión tecnológica tan resplandeciente no debe ocultarnos los cambios fundamentales que ya se han producido en los materiales con los que se fabrican los turismos de hoy día. Si bien la fabricación de automóviles se apoya en tecnologías "ya maduras", está sometida a fuertes presiones externas: la competencia extranjera, las preferencias siempre cambiantes del público, los precios del combustible, la legislación oficial y la innovación técnica. A mediados de la década de los 70, estas fuerzas comenzaron a hacerse sentir, lenta pero inexorablemente, y modificaron el tamaño, forma y materiales de construcción de automóviles y camiones. A mediados de los 80, el automóvil norteamericano, con su alto contenido en aluminio, plástico y acero de alta resistencia y su bajo perfil, es ya una máquina muy diferente de sus inmediatos predecesores. Y en razón al tamaño de la industria del automóvil, tales cambios no pueden sino condicionar poderosamente los esquemas generales de producción y consumo de materiales en los Estados Unidos.



Materiales para el aprovechamiento de la energía

El bienestar económico de una sociedad moderna requiere la captación de energía, su transformación en diversas presentaciones y su consumo de miles de maneras distintas. En todas esas etapas se requieren materiales especiales

Richard S. Claassen y Louis A. Girifalco

La vida de una sociedad industrial se mantiene gracias a un continuo flujo de materia y otro de energía. Ambos flujos son inseparables. Sin consumo de energía no podrían transformarse las materias primas en materiales adecuados; y sin dichos materiales, apenas podrían aprovecharse las fuentes de energía. Cualquier faceta de la utilización de la energía (su extracción, manipulación y refinado, su transformación de una forma en otra, su distribución y su consumo eficaz) depende hoy de complejos materiales, fabricados a la medida de cada caso: la catalización de una reacción química, la absorción de luz solar, la conducción de electricidad o la resistencia a la corrosión y el calor.

Las innovaciones introducidas en los materiales que manipulan la energía se reflejan en el nivel de vida de la sociedad, porque éste depende, en gran medida, del consumo de energía. Tal dependencia se observa fácilmente comparando las tasas de consumo energético de diversos países; en particular, representando el producto interior bruto en función del consumo de energía per cápita. Se advierte que el nivel de vida está estrechamente vinculado al consumo energético. También la historia de los Estados Unidos, por ejemplo, muestra esa correlación. Desde 1900, el crecimiento del consumo de energía en esa nación ha superado el crecimiento de la población, excepto en los años 30, es decir, durante la Gran Depresión. A la vez, se ha incrementado enormemente la eficacia de la producción de energía. En 1899, el rendimiento medio de la producción de energía eléctrica era de un 4 o 5 por ciento; en 1984, se situaba ya en el 33 por ciento. Mientras que el consumo per cápita de fuentes de energía primarias (como el petróleo) se ha triplicado desde principios de siglo, el consumo per cápita de energía en su estado final (en forma de electricidad) se ha multiplicado por más de diez.

El aprovechamiento de la energía es hoy superior a antaño. En los Estados Unidos, la razón entre el producto nacional bruto (en dólares constantes) y el consumo de energía se mantuvo bastante constante en la primera mitad de siglo. Desde entonces ha ido creciendo: se genera actualmente casi tres veces más PNB por cada unidad de energía consumida que en 1970. Varias razones explican esa tendencia. Las nuevas tecnologías, así los ordenadores y la telecomunicación, tienden a crear una menor demanda de energía. Cada vez cobra más importancia el sector económico de los servicios, que tampoco es de consumo energético intensivo, si se compara con la industria y el transporte. Otra razón estriba seguramente en que los nuevos materiales facilitan la conservación de la energía y su utilización más eficaz.

¿Cómo han alcanzado tal importancia los materiales en el aprovechamiento de las fuentes energéticas? Se nos ocurren dos respuestas interrelacionadas. La primera es que la energía se está explotando de un modo cada vez más complejo. Cuando los procesos económicos eran más sencillos, se extraía carbón para su combustión directa ordenada a la generación de calor. Sigue aún quemándose gas natural sin apenas tratamiento. No acontece lo mismo con el petróleo, que exige un exhaustivo proceso de refino antes de ofrecerlo al consumo, y la electricidad se obtiene por conversión a gran escala de diversas fuentes. En las tecnologías energéticas futuras, esa tendencia se mantendrá. En realidad, es probable que, de entre todas las posibles nuevas tecnologías energéticas, solamente la solar para calefacción y agua caliente doméstica haga uso directo de la fuente de energía, sin una transformación previa. Las restantes formas requerirán algún tipo de tratamiento o transformación, como la licuefacción del carbón o la generación de electricidad. En esas transformaciones, los materiales intervendrán con una presencia destacada.

La necesidad de materiales en el desarrollo práctico de un programa energético se satisface ocasionalmente con la producción de un material nuevo. Más a menudo, dicha necesidad se cubre con la modificación o mejora de un material preexistente. Las propiedades de un material reflejan los pasos, o procesos, requeridos para convertir las materias primas en el producto final. Vale de ejemplo el acero. Puede forjarse (deformarse mecánicamente a partir de un lingote) o fundirse (soli-

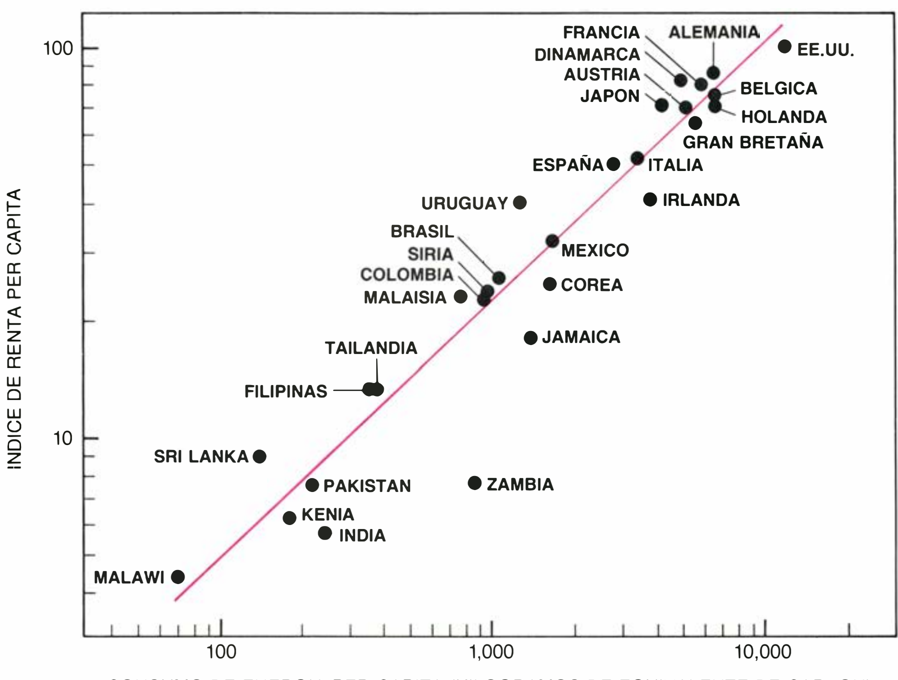
1. EL EMPEÑO EN OBTENER MATERIALES que mejoren el tratamiento de la energía queda simbolizado en este experimento, realizado en el Laboratorio Nacional Sandia de Livermore, California, que forma parte de un proyecto destinado a aliviar un grave problema al que se enfrentan las compañías eléctricas: la deposición de escoria en los tubos de las calderas. En una planta común, el calor producido por el quemado de combustibles, como el carbón, calienta las tuberías de agua; el calor convierte el agua en vapor, que mueve las turbinas de generación de electricidad. Los productos de la combustión depositados en los tubos reducen la transferencia de calor al agua. En la figura se "siembran" partículas de pirita (disulfuro de hierro), fuente importante de azufre en el carbón, en una llama de aire y metano que calienta un tubo fabricado con una aleación de platino y rodio. Los productos de combustión dispersan el haz de un láser de iones de argón. La luz del haz dispersado presenta longitudes de onda desplazadas por el movimiento (principalmente vibraciones) de las moléculas afectadas por el haz. El rayo ofrece, por consiguiente, un análisis continuo de los depósitos que van acumulándose. Ese tipo de datos facilitará la fabricación de aleaciones superiores.

dificarse en un molde). Las propiedades del producto resultante, y su comportamiento, son muy diferentes: el acero forjado posee gran fortaleza, mientras que el colado suele ser más barato. La mayoría de los esfuerzos empeñados en la preparación de materiales adecuados para la captación y utilización de la energía se han centrado en el desarrollo de procesos de producción de los prototipos cuyas propiedades satisfagan las necesidades del proyecto.

La segunda razón de la importancia de los materiales en un programa energético es que el desarrollo de nuevos productos y la mejora de los existentes repercuten directamente en el coste de la energía. Tal repercusión debe ponderarse detenidamente. Por un lado, la energía constituye un próspero negocio. En 1982, la producción de combustible fósil en Estados Unidos se valoró en 158.000 millones de dólares, el coste de las importaciones fue de 53.000 millones de dólares y los gastos de consumo de energía totalizaron 418.000 millones de dólares. Por otro lado, 418.000 millones de dólares suponen sólo una fracción muy pequeña del PNB. En otras palabras, la energía ha resultado barata. A lo largo de la primera mitad de siglo, el coste de los combustibles minerales (carbón, petróleo, gas natural y gas natural licuado) no superaba el 4 por ciento del PNB. A veces representó sólo el 2 por ciento.

Disponer de energía barata resulta esencial para el crecimiento económico. En los años 70, cuando se produjo la "crisis del petróleo" provocada por la OPEP, la Organización de Países Exportadores de Petróleo, el coste de los combustibles (en porcentaje del PNB) se incrementó unas cuatro veces, aproximadamente, alcanzándose el coste relativo de la energía más alto de la historia norteamericana. De 1973 a 1975, el PNB per cápita disminuyó: en 1974 era un 8 por ciento inferior al de 1973, y no recuperó el nivel hasta 1977. Más recientemente, el coste de la energía (en porcentaje del PNB) ha disminuido, al paí que la economía ha concentrado sus esfuerzos en la producción de energía propia y ha aprendido a sacarle mayor rendimiento. Tales ganancias se han acelerado con la mejora de los materiales.

Las células solares fotovoltaicas constituyen un ejemplo excelente de cómo la innovación en materiales ya disponibles puede reducir el coste de la energía. Esas células, que producen electricidad directamente de la luz solar, se han empleado con éxito en las naves espaciales desde 1974. En tierra, su atractivo es único: no contaminan el medio ambiente, ni consumen fuentes de energía agotables. Sólo su coste ha impedido que contribuyan de modo importante a la producción total de electricidad.



2. ESTRECHA RELACION entre el consumo de energía y el nivel de vida. Se advierte al comparar el consumo de energía (*eje horizontal*) y la capacidad adquisitiva (*eje vertical*) de 28 países. Las cifras se compilaron a partir de datos obtenidos en 1979; el cálculo de la capacidad adquisitiva es obra de Irving B. Kravis, Alan Heston y Robert Summers, de la Universidad de Pennsylvania, quienes se basaron en estimaciones del coste real (en moneda local) de una larga relación de bienes y servicios. La economía de Estados Unidos muestra valores máximos de uso de energía y de capacidad adquisitiva, pero se ajusta a la tendencia general.

Para comparar el coste de las células solares con otros sistemas de generación de electricidad podemos recurrir a un patrón económico convencional: la inversión por unidad de capacidad de producción expresada en términos del coste (en dólares) por kilowatt de capacidad generadora instalada. En 1975, las plantas de generación de electricidad por combustión de carbón, para producir vapor que alimentara turbinas, supusieron un coste de cerca de 230 dólares por kilowatt; las centrales nucleares, de 500 dólares por kilowatt. Las instalaciones fotovoltaicas solares, cuya producción depende en gran medida de la intensidad, variable, de la luz solar, se evalúan en dólares por kilowatt generado con la capacidad máxima. (La producción media anual de una instalación solar, ubicada en el desierto del sudeste de Estados Unidos, es alrededor de un quinto de la capacidad máxima). En 1975, el coste de un conjunto de células fotovoltaicas planas (la disposición más sencilla) se cifraba en unos 75.000 dólares por kilowatt de capacidad máxima, unas 300 veces el precio invertido en una planta de combustión de carbón. Sin embargo, dado que el panel de células solares no necesita combustible, la comparación resulta incompleta. Mas no por ello deja de ilustrar cuán antieconómicas resultaban las células fotovoltaicas.

La razón del elevado coste de las células residía principalmente en sus materiales. Las primeras células fotovoltaicas se fabricaban con grandes monocristales de silicio de extraordinaria pureza, obtenidos por el proceso de Czochralski: se tiraba lentamente de una pequeña semilla del cristal, sumergida en un depósito de silicio líquido purísimo, produciéndose la acreción del silicio. La resultante "ampolla" monocristalina (término genérico que se aplica a una masa sintética dotada de estructura cristalina) se cortaba en láminas finas, de aproximadamente un milímetro de grosor.

A continuación, las láminas se "dopaban": se colocaban en un horno y se provocaba la difusión en ellas de átomos dopantes (impurezas esenciales para el funcionamiento de las células), que pasaban a ocupar ciertas posiciones de la red cristalina. Finalmente, las láminas "dopadas" se metalizaban (se las dotaba de conductos metálicos por donde transportar la corriente eléctrica

	MATERIALES ELECTRICOS	CERAMICAS	NUEVOS POLIMEROS	MATERIALES HIBRIDOS	NUEVOS METALES
MINERIA	ELECTRONICA DE ALTAS TEMPERATURAS	TALADROS DUROS PARA BARRENOS	EMPAQUETADORES Y SELLADORES		METALES RESISTENTES A LA CORROSION
REFINO		CATALIZADORES			METALES RESISTENTES A LA CORROSION
REFINO Y COMBUSTION DEL CARBON		CATALIZADORES; CERAMICAS RESISTENTES A LA EROSION		HIBRIDOS RESISTENTES A LA EROSION	
ENERGIA NUCLEAR	ELECTRONICA RESISTENTE A LA RADIACION	INMOVILIZADORES DE RESIDUOS RADIACTIVOS; AISLADORES DE PLASMA			CONTENEDORES PARA RESIDUOS RADIACTIVOS; ALEACIONES RESISTENTES A LA RADIACION Y A LAS ALTAS TEMPERATURAS
GENERACION Y TRANSMISION DE ENERGIA	SUPERCONDUCTORES	COMPONENTES DE TURBINAS	AISLANTES		HELICES DE TURBINAS COMPONENTES DE SISTEMAS DE VAPOR
ENERGIA SOLAR	CELULAS SOLARES FOTOVOLTAICAS DE BAJO COSTE	ABSORBENTES SELECTIVOS DE LA LUZ	ENCAPSULACION DE CELULAS SOLARES		
COMBUSTION DE RESIDUOS					METALES RESISTENTES A LA CORROSION
ENERGIA GEOTERMICA	ELECTRONICA DE ALTAS TEMPERATURAS				METALES RESISTENTES A LA CORROSION
CONSERVACION DE LA ENERGIA	IMANES EFICACES SISTEMAS DE CONTROL DE LA ENERGIA	COMPONENTES DE INTERCAMBIADORES DE CALOR	COMPONENTES DE BAJO PESO PARA VEHICULOS	COMPONENTES DE BAJO PESO PARA VEHICULOS	ALEACIONES DE ALTAS TEMPERATURAS RECICLADO

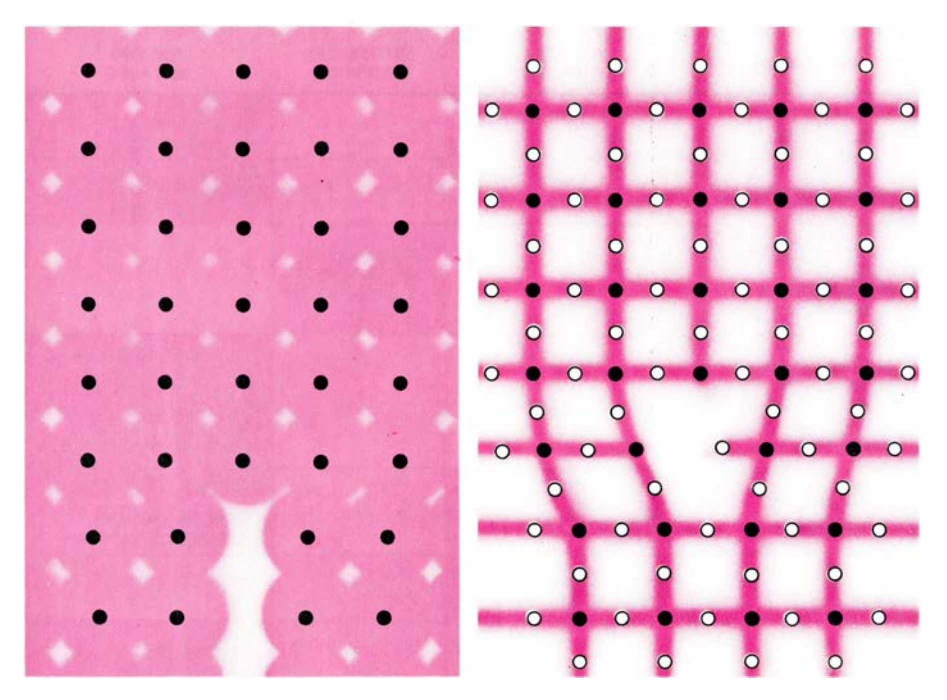
3. REQUISITOS DE LOS NUEVOS MATERIALES, que vienen impuestos por las diferentes clases de materiales (*línea superior*) y por los distintos sistemas de energía (*columna izquierda*); las necesidades están dictadas por las tensiones mecánicas, las temperaturas, las presiones y los entornos químicos en los cuales deben operar. Los instrumentos para la minería o para la extracción de energía geotérmica tendrán que resistir las elevadas temperaturas de la corteza terrestre; los materiales utilizados para confinar el plasma en los reactores nucleares de fusión deberán resistir altas temperaturas y una intensa radiación. El color sugiere la importancia del esfuerzo que se está realizando para encontrar cada material: el color más oscuro señala un esfuerzo de desarrollo más intenso.

que producían, y se encapsulaban (para protegerlas del medio ambiente). Se sigue una secuencia similar en la producción, a bajo coste, de circuitos integrados: en una lámina de 10 centímetros de diámetro se alojan centenares de pastillas semiconductoras, en cada una de las cuales se instala una intrincada red de circuitos. Desafortunadamente, la lámina entera constituye, en su aplicación fotovoltaica, una sola célula solar, cuya producción máxima es de alrededor de un watt.

El futuro es bastante más esperanzador; las innovaciones introducidas en el proceso de fabricación de los materiales de células fotovoltaicas han reducido ya el coste de las células. La pureza normal del silicio (de un 99 por ciento) puede mejorarse aún más, y adaptarla a la de las células fotovoltaicas, mediante el proceso Siemens; en éste, el silicio se disuelve químicamente en tricloruro de sileno ($SiHCl_3$) y se reconvierte luego en silicio sin impurezas de ningún tipo. Otra técnica, desarrollada por la empresa Union Carbide, convierte el silicio en sileno (SiH_4) y luego lo reduce a silicio. Ambos procesos prometen rebajar a la mitad el coste de los materiales de las células fotovoltaicas. Mientras tanto, la empresa Kayex ha ido refinando las diversas fases del proceso Czochralski, de suerte que hoy se producen ampollas con una sección traversal mayor y menor coste unitario.

La innovación que probablemente ejerciera mayor impacto en el coste de los materiales de las células fotovoltaicas sería el crecimiento directo de cristales de silicio en forma de láminas aplicables directamente, o casi, a la fabricación de células solares. Dos técnicas ofrecen esa posibilidad, aunque deben resolverse antes algunos problemas. En la primera técnica, llamada de "crecimiento de películas con bordes definidos", el monocristal extraído de la masa fundida se comprime con troqueles de grafito hasta formar una sola lámina. El problema aquí es que el silicio reacciona con el grafito, y precipita carburo de silicio. De los intentos por eliminar tales impurezas derivó la segunda técnica, el proceso de "entramado dendrítico". En este sistema, se obtienen cintas de silicio, las llamadas dentritas, a partir del silicio fundido bajo un control muy preciso de la temperatura. Las cintas pueden extraerse del silicio fundido sin necesidad de troqueles. En este caso, el problema es la lentitud con que crecen las cintas. Un mejor conocimiento de las propiedades del material, como el comportamiento del silicio al deslizarse, es decir, al deformarse lentamente, a temperaturas próximas a las de fusión, arrojaría parte de la información necesaria para acelerar el ritmo de producción.

La preparación del silicio constituye sólo una parte del costo de las células fotovoltaicas, que deben luego doparse, metalizarse, interconectarse y encapsularse. La mejora de esas etapas débese al nutrido número de avances de la tecnología, registrados en los propios materiales y en los procesos de fabricación. En la metalización hoy se emplea cobre, en vez de plata; se ha empezado a utilizar materiales perfeccionados para el encapsulamiento y se ha automatizado la soldadura de las conexiones eléctricas entre células. Las múltiples innovaciones tienen su reflejo en las cifras: se presume que la construcción a gran escala de un conjunto de células solares fotovoltaicas costaría ahora 1500 dólares por kilowatt de capacidad máxima (en dólares de 1985). Se trata de un avance espec-



4. DUCTILIDAD, o capacidad para deformarse plásticamente; es más propia de los metales que de las cerámicas. En un metal (*izquierda*), los electrones exteriores de cada átomo tienden a ser compartidos entre átomos, produciéndose una tensión deslocalizada (*sombra de color*). En consecuencia, la tensión en un borde agudo de una pequeña hendidura o defecto del material se subsana fácilmente: basta compartir una pequeña fuerza para reparar el defecto. En una cerámica (*derecha*), el reparto de electrones entre los átomos se establece en forma de enlaces químicos, muy localizados y fuertemente direccionales (*líneas de color*). El desplazamiento de un defecto requiere la ruptura de dichos enlaces y el establecimiento de otros nuevos, de tal forma que la fuerza necesaria para corregir el defecto puede, a veces, exceder la tensión de fractura del material. En consecuencia, la presencia de una pequeña grieta puede provocar, bajo la tensión, una ruptura total. Se están desarrollando técnicas de fabricación para obtener cerámicas libres de defectos.

tacular respecto de la situación de 1975. Durante ese mismo período de diez años, el coste de una central convencional de carbón se ha incrementado hasta los 1100 dólares por kilowatt, aproximadamente. Ahora bien, para que su impacto sobre la producción de energía sea significativo, el coste de las células solares fotovoltaicas deberá reducirse aún más.

Además de su influencia sobre el coste de la energía, los materiales condicionan la eficacia del consumo. En todos los sectores de la economía, el rendimiento es hoy bajo. Los sectores residencial y comercial tienen una eficacia media del 65 por ciento, determinada por la simple comparación del calor desprendido por las calderas respecto de la energía contenida en el combustible que queman. La eficacia termodinámica total de la calefacción y refrigeración de en un edificio se encuentra bastante por debajo del 10 por ciento. En el sector del transporte, la cifra es del 10 por ciento. En el sector industrial, la eficacia oscila entre el 10 y el 35 por ciento. El rendimiento global de la economía se cifra en el 10 por ciento.

Una de las razones de tan menguado rendimiento reside en las pérdidas que se registran a lo largo de la trayectoria del flujo de energía. Considérese, por ejemplo, la eficacia de los diversos pasos que intervienen en la conversión de la energía química del petróleo en el trabajo mecánico de un automóvil. La extracción del petróleo crudo, el refino que lo transforma en gasolina y su transporte son relativamente eficaces. Por acumulación, se pierde, sin embargo, un 19 por ciento de la energía contenida en la fuente primaria; queda, por tanto, el 81 por ciento. El paso siguiente es el motor de combustión interna del automóvil, cuya eficacia se halla en torno al 30 por ciento: el rendimiento total acumulado no supera ya el 24 por ciento. A ello deben sumarse las pérdidas en la transmisión mecánica del motor al movimiento final de las ruedas en la carretera. En síntesis, en la propulsión del automóvil se aprovecha menos del diez por ciento de la energía que contiene el petróleo crudo de partida.

La introducción de diseños y materiales mejores incrementaría sustancialmente la eficacia del consumo de energía en las próximas décadas. La explotación de la energía es un proceso termodinámico en el cual la fuente de energía concentrada se convierte en una forma de energía útil, que en última instancia se disipa como calor degradado. La segunda ley de la termodinámica establece un límite a la eficacia del proceso. En particular, la máxima fracción de energía calorífica que puede convertirse en trabajo en un proceso dado depende exclusivamente de dos temperaturas, la de salida (T_2), de bajo nivel, y la de entrada, concentrada, (T_1). En términos algebraicos, la fracción máxima es $1-T_2/T_1$. Se trata, pues, de alcanzar una temperatura de entrada tan alta como sea posible, manteniendo baja la temperatura de salida.

La temperatura de entrada de cualquier máquina real viene determinada por las características de sus materiales. En una central eléctrica de carbón típica, por ejemplo, la temperatura del vapor que alimenta las turbinas es de 810 grados Kelvin (537 grados Celsius), y la temperatura del agua que sale de las turbinas es de 370 grados Kelvin (97 grados Celsius). En consecuencia, el rendimiento máximo es del 54 por ciento.

Las pérdidas de las centrales reales rebajan la eficacia hasta alrededor del 35 por ciento. El esfuerzo principal que se está realizando en los materiales para plantas eléctricas se centra en el diseño de materiales que resistan temperaturas de operación más altas que las actuales, de modo que resulte más ventajoso el límite termodinámico de la eficacia.

En particular, las hélices de turbina de naturaleza cerámica ofrecen, a largo plazo, perspectivas de mejora del rendimiento termodinámico. Los materiales cerámicos, como el nitruro de silicio (Si_3N_4) y el carburo de silicio (SiC), son estables durante largos períodos a temperaturas superiores a los 1200 grados Celsius. Pero son poco dúctiles. Las cerámicas no conocen la deformación plástica, ni pueden fluir, o "sanar", alrededor de una pequeña grieta o hendidura. Por tanto, el empleo prolongado a temperaturas elevadas y bajo una gran tensión mecánica provocaría la rotura de las hélices. Se están desarrollando métodos que permitan superar esa dificultad. Por ejemplo, se están realizando trabajos exhaustivos en los procesos de fabricación, así la "presión en caliente" del nitruro de silicio (sinterizado a presiones y temperaturas elevadas). Tales esfuerzos deben desembocar en la producción de nuevas cerámicas con poquísimas grietas. Sin embargo, antes de introducir esos materiales en plantas reales, donde se les exigirá una larga vida de trabajo, ha-

brán de someterse a una evaluación a largo plazo bajo las presiones, temperaturas y el entorno corrosivo que resultan habituales en su medio de funcionamiento.

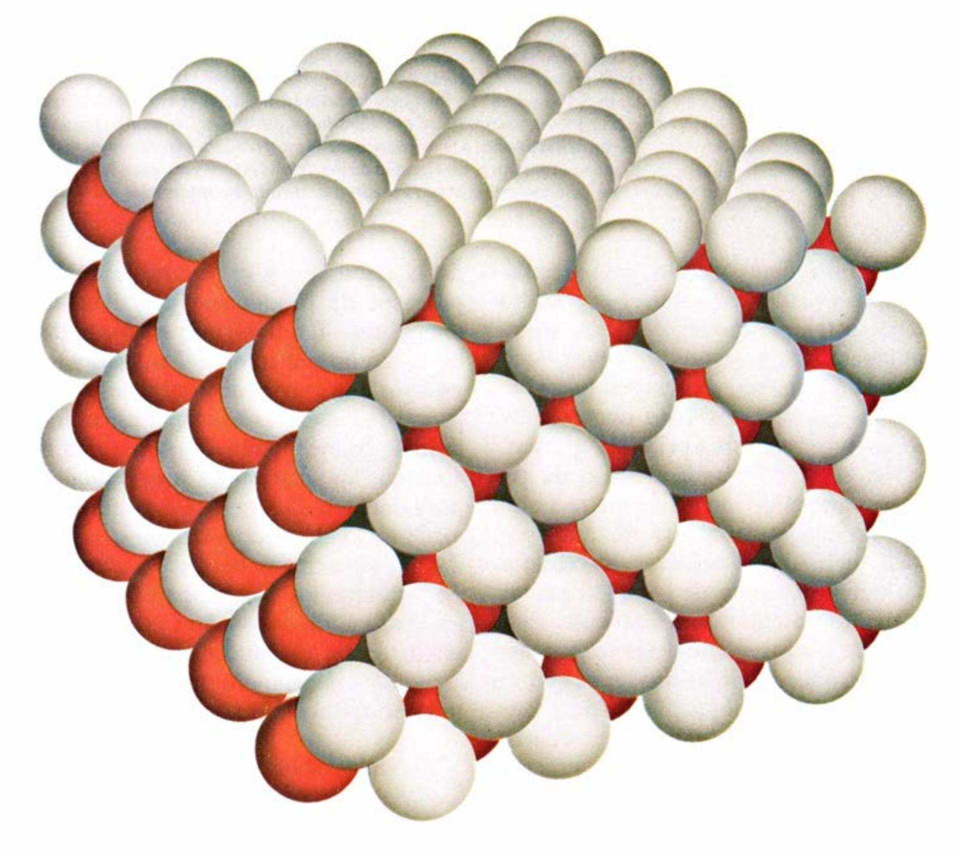
La aleación intermetálica de aluminio y níquel (Ni_3Al) ofrece también perspectivas de operación a altas temperaturas y con buen rendimiento termodinámico. El interés de ese producto deriva de su estructura cristalina, ordenada y extensa. Los átomos de ambos componentes metálicos, níquel y aluminio, no se mezclan aleatoriamente. Aparece un orden propio, en el que dos subredes, una constelación de átomos de niquel y otra constelación de átomos de aluminio, se imbrican mutuamente. Se obtiene así un material de alta estabilidad, resistente a la corrosión y oxidación, y de gran fortaleza mecánica a altas temperaturas. De hecho, su punto de deformación (la carga bajo la cual aparece la primera deformación permanente) aumenta con la temperatura.

Lo que ha impedido una aplicación más amplia del aluminiuro de níquel es que la forma comercial policristalina de la aleación presenta escasa ductilidad. Entre los granos cristalinos aparecen fracturas antes de que éstos se deformen y sanen el defecto. Trabajos recientes demuestran que un control cuidadoso de las proporciones de níquel y aluminio, y la adición de pequeñas cantidades de boro, en un proceso de microaleación, aumentan la cohesión de los granos, hasta el extremo de que las roturas, si se producen, lo harán en el interior de los propios granos. Por otra parte, esos trabajos muestran que la sustitución de aluminio por hafnio vigoriza intensamente la fuerza de la aleación y coloca el punto de resistencia máxima a una temperatura de 850 grados Celsius. Se obtiene entonces un material que debería mostrarse eficaz en muchas situaciones donde el funcionamiento a alta temperatura incrementa el rendimiento. Entre sus posibles aplicaciones en plantas generadoras de electricidad, citemos las hélices de turbinas, las unidades de intercambio de calor y las tuberías de alta presión.

Todo lo cual no significa que las únicas posibilidades de mejorar el rendimiento de la utilización de la energía obliguen a subir la temperatura. Existe, por lo menos, una posibilidad en el extremo opuesto; las temperaturas ultrabajas, a las que ciertos materiales se convierten en superconductores y cesan de oponer resistencia al paso de la corriente eléctrica. Recordemos el caso de los cables superconductores: hilos conductores de corriente hechos con un superconductor, refrigerado hasta tal punto que la temperatura es inferior a su cota crítica (la temperatura a la cual ese material adquiere la superconductividad). La energía eléctrica transportada hoy día por líneas de alta tensión entre torres metálicas podría conducirse de un modo mucho más eficaz mediante cables superconductores de calibre muy inferior. La mayor inversión y la necesidad de refrigerar los cables quedaría justificada en grandes concentraciones urbanas, o en lugares donde está prohibido transportar electricidad por tendido aéreo.

La amplia gama de materiales conocidos como superconductores de tipo II (porque comparten ciertas propiedades magnéticas) son candidatos de interés para la fabricación de cables superconductores; soportan corrientes cuyas densidades sobrepasan los 1500 ampère por centímetro cuadrado de sección del cable. La aleación de titanio y niobio (NbTi), un superconductor de tipo II, presenta especial atractivo, pues se transforma fácilmente en alambre fino. Sin embargo, el titanio-niobio tiene una temperatura crítica de 9,5 grados Kelvin (9,5 grados por encima del cero absoluto). Convendría utilizar un superconductor de temperatura crítica superior, pues la refrigeración de ese material resultaría menos problemática y rebajaría, en consecuencia, los costos y el consumo de energía. El estaño-niobio (Nb_3Sn) tiene una temperatura crítica de 18,1 grados Kelvin. Para minimizar el coste de fabricación de los cables se ha desarrollado un proceso de transformación del niobio puro en cintas, que se introducen en estaño; en una reacción química a alta temperatura se crea la aleación de estaño y niobio. En el último paso del proceso, las cintas de estaño y niobio, quebradizas, se intercalan entre conductores normales.

Conseguir un cable útil (un haz de hilos superconductores) requiere algunas etapas más. En primer lugar, el haz debe envolverse con un aislante. El más socorrido, un papel impregnado de parafinas, no nos sirve a temperaturas extremadamente bajas. Se está desarrollando, por ello, un método alternativo: algunas muestras de laboratorio



5. ALUMINIURO DE NIQUEL, que exhibe un orden cristalino notable y en el que las constelaciones de átomos de níquel (*blanco*) y de aluminio (*color*) se interpenetran. El orden confiere a la aleación una gran fortaleza, incluso a altas temperaturas. Por procesamiento ulterior (adición de pequeñas cantidades de boro y sustitución de átomos de aluminio por átomos de hafnio), se obtiene una forma policristalina que conserva su fuerza a temperaturas elevadas. El aluminiuro de níquel, también muy resistente a la corrosión, permitiría a los sistemas de generación de energía operar a temperaturas superiores y, por tanto, con mayor eficacia.



6. STRATAPAX, que mejora la actuación de las barrenas de los taladros empleados en la perforación de pozos de petróleo y gas. Consta de pequeños diamantes, sinterizados (calentados sin fusión) para formar un material policristalino extremadamente duro y fuerte, que carece de los débiles planos de exfoliación característicos de los diamantes naturales. Este material fue desarrollado por la empresa General Electric; se unen pequeñas láminas del producto (*gris oscuro*) a tacos de carburo de wolframio y se montan en la barrena. La rotación de la barrena expone el stratapax a la roca. En formaciones semiduras, una barrena de stratapax taladra cuatro veces más rápido que las barrenas normales, y, por añadidura, dura más. Los ahorros anuales de la industria norteamericana de perforación gracias a la introducción de ese producto se estiman en varios cientos de millones de dólares. El stratapax constituye un ejemplo de material desarrollado para facilitar la producción de energía; la mayoría de las innovaciones se realizan por mejora de materiales existentes.

de polipropileno plástico han demostrado propiedades aislantes excelentes a bajas temperaturas. A temperatura ambiente, las muestras, flexibles, facilitan la instalación. A temperaturas bajas, las muestras exhiben una pérdida dieléctrica baja, es decir, aíslan bien. Se ha registrado aquí un caso de retroalimentación frecuente en tecnología: las muestras de ese material poseen unas características excelentes para el aislamiento de los conductores normales a temperatura ambiente. Empero, la transferencia de las propiedades del polipropileno producido en el laboratorio al polipropileno de fabricación comercial requerirá un esfuerzo adicional. Debe encontrarse un proceso que produzca suficiente cantidad de ese plástico libre de las impurezas que comprometerían la capacidad aislante del material.

Los nuevos materiales pueden incidir en el aprovechamiento eficaz de la energía de un tercer modo: la mejora de la fiabilidad y la seguridad de los procesos de producción y conversión energética. La fiablidad es fruto del buen diseño, así como del análisis y los ensayos minuciosos de materiales cuyas propiedades en las condiciones de trabajo se conocen bien. La seguridad la aportan los materiales desarrollados para una necesidad específica, una vez examinado su comportamiento en todas las situaciones de trabajo, incluso en las extremas e improbables. La seguridad ha ido cobrando cada vez más importancia; el público espera que la tecnología de la energía carezca de toda posibilidad de accidente.

La eliminación de los residuos radiactivos de los reactores nucleares exigirá ese tipo de tecnología. La estrategia general de eliminación de residuos considera tres etapas sucesivas. En primer lugar, el residuo ha de formar parte integrante de un sólido relativamente insoluble. En segundo lugar, el sólido en cuestión ha de envolverse con una barrera impermeable. Finalmente, el residuo y sus envolturas se enterrarán en una estructura geológica seca y estable. Los dos primeros pasos están reclamando la creación de nuevos materiales.

Se trabaja desde hace tiempo en esa línea; por ejemplo, se ha comprobado que el vidrio de borosilicato constituye un excelente hospedador de los residuos radiactivos, es decir, resulta excelente para el primer paso del proceso de la deposición de residuos. Si en el futuro se necesitara un hospedador superior, habría que pensar en una cerámica. En 1978, Alfred E. Ringwood, de la Universidad Nacional Australiana, estaba ya proponiendo una cerámica cuando sugirió el empleo de SYNROC –mezclas sintéticas de circonolita ($CaZrTi_2O_7$) y perovskita ($CaTiO_3$)– como trampa para los átomos radiactivos. Las versiones naturales de esos minerales son extremadamente insolubles y, según se ha comprobado, pueden secuestrar átomos de elementos radiactivos, uranio y torio incluidos, durante períodos de centenares de millones de años. La fabricación de SYNROC a partir de componentes que contengan óxido de titanio y óxido de circonio es bastante fácil y directa. Los ensayos realizados confirman su gran estabilidad. Ahora habría que encontrar el material más adecuado para estabilizar las mezclas de los elementos radiactivos de los distintos tipos de residuos.

El segundo paso de la deposición de los residuos, establecer una barrera impermeable entre el residuo y el entorno, precisa de un contenedor, o envase, altamente resistente a la corrosión y la degradación. La necesidad deriva, en parte, de que la velocidad con que los productos químicos atacan un material tiende a aumentar con la temperatura; la radiactividad del cesio y del estroncio contenidos en los residuos mantendrán el contenedor caliente durante unos 300 años (la temperatura inicial del contenedor, cuando la radiactividad alcanza su mayor intensidad, será de unos 200 grados Celsius). Para predecir el comportamiento a largo plazo del contenedor, a partir de ensayos a corto plazo, deberá poseerse un conocimiento profundo de su mecanismo de degradación. La intención es colocar el contenedor en un entorno seco. Ello no obstante, los contenedores se evalúan sumergiéndolos en salmuera, el peor ambiente posible (por ser el más corrosivo).

Está en estudio la aleación de titanio conocida por Ti código 12 para averiguar si pudiera convertirse en el material de fabricación de los contenedores. Se ha comprobado que la aleación crea, al exponerla al aire, una capa de óxido que ofrece protección contra la corrosión ulterior. Ensayos exhaustivos han establecido que la aleación es estable contra la corrosión general y local, incluso a temperaturas altas y bajo el bombardeo de radiación gamma, que penetra en el contenedor. Debe trabajarse aún más si queremos conseguir una aleación adecuada para el transporte de contenedores llenos de residuos hasta su lugar de deposición permanente. Un accidente durante el transporte podría aplastar el contenedor; deben, por tanto, comprobarse las propiedades mecánicas y estructurales del material para juzgar la resistencia del contenedor ante un accidente de ese tipo.

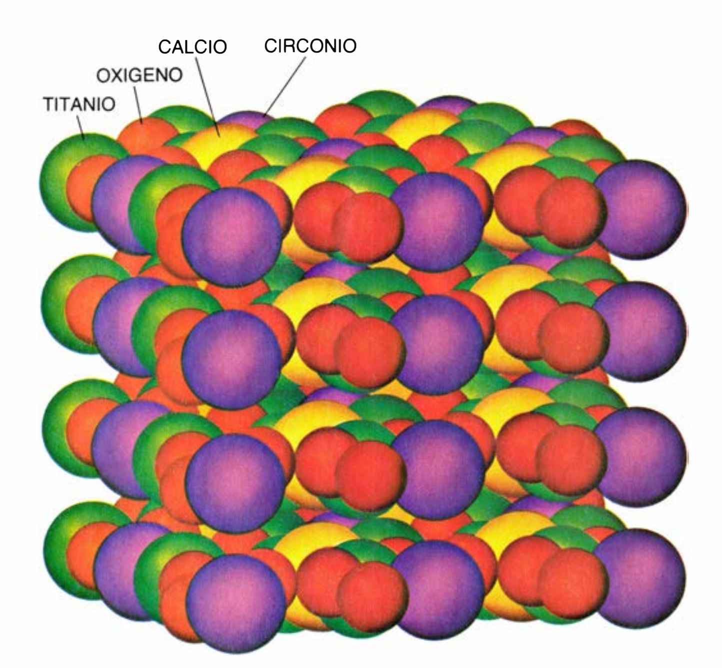
En una escala más amplia, el desarrollo de nuevos materiales, o la mejora de los existentes, capacita a las sociedades para alterar la proporción de sus fuentes de suministro de energía. Las antiguas –músculo, madera, agua y viento– fueron las primeras en simultanearse. Pero son fuentes energéticas que no pueden ofrecer el alto volumen de formas concentradas de energía que requiere una sociedad industrial. En los Estados Unidos, por ejemplo, la expansión industrial que siguió a la guerra civil sólo fue posible porque los combustibles minerales se convirtieron en la principal fuente de energía. En 1910, el carbón proporcionaba las tres cuartas partes de la energía consumida en Norteamérica. Hoy, el petróleo y el gas aportan la mayor parte de la misma.

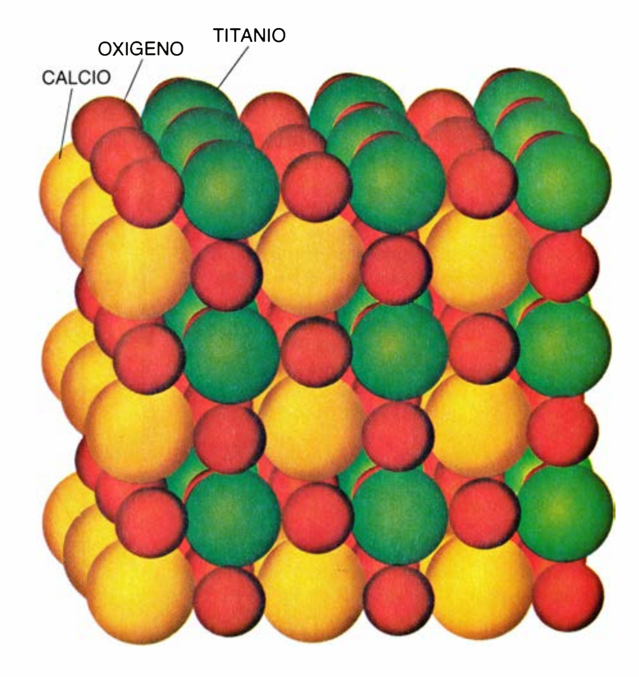
En resumen, el carbón tardó más de 60 años en convertirse en el combustible dominante, y un período similar necesitaron el petróleo y el gas para superar al carbón. Los sistemas de suministro y consumo de energía son grandes y complejos; se requieren décadas para que una nueva fuente aporte una contribución significativa.

Esta escala temporal probablemente se mantenga en el futuro. Las predicciones concretas están sujetas a valoraciones personales. Está claro, no obstante, que la contribución del petróleo bajará y que las fuentes de energía renovables, como la luz solar y el viento (explotadas por células fotovoltaicas y molinos eólicos, respectivamente), desempeñarán un papel cada vez más importante. Cabe prever también la contribución de la energía nuclear (fisión y fusión). Todas esas fuentes generarán, sobre todo, electricidad. Más acuciante parece que será contar con un combustible líquido para el sector del transporte. La conversión del carbón a una forma líquida parece, bajo la perspectiva actual, la solución más prometedora.

La necesidad de disponer de materiales especializados en esa transformación ha obligado a plantearse el desarrollo de catalizadores adecuados.

La licuefacción del carbón se logró hace ya seis décadas. En esencia, requiere la adición de hidrógeno al carbón mediante una reacción química. Se obtienen así varios líquidos, gasolina incluida, en función de la cantidad de hidrógeno añadida. Un aspecto afortunado del proceso es que la adición de hidrógeno elimina la mayoría del azufre existente en el carbón, ligado a los componentes orgánicos o presente como disulfuro de hierro. La reacción directa del hidrógeno con el carbón requiere temperaturas y presiones elevadas, las cuales, a su vez, exigen vasijas de reacción de gran tamaño, fabricadas con materiales caros. El desarrollo de catalizadores que faciliten la reacción en condiciones menos severas resulta clave, por tanto, para alcanzar la producción económica de combustibles líquidos. Los catalizadores disponibles no alcanzan la calidad deseada. Casi la mitad del capital que deba invertirse en una planta de licuefacción de carbón a escala industrial deberá destinarse a las vasijas de reacción y a su equipo asociado. Las mejoras en la selectividad y en la eficacia de los catalizadores permitirán que el proceso de licuefacción se realice a temperaturas y presiones inferiores, lo que redundaría en un ahorro económico notable.





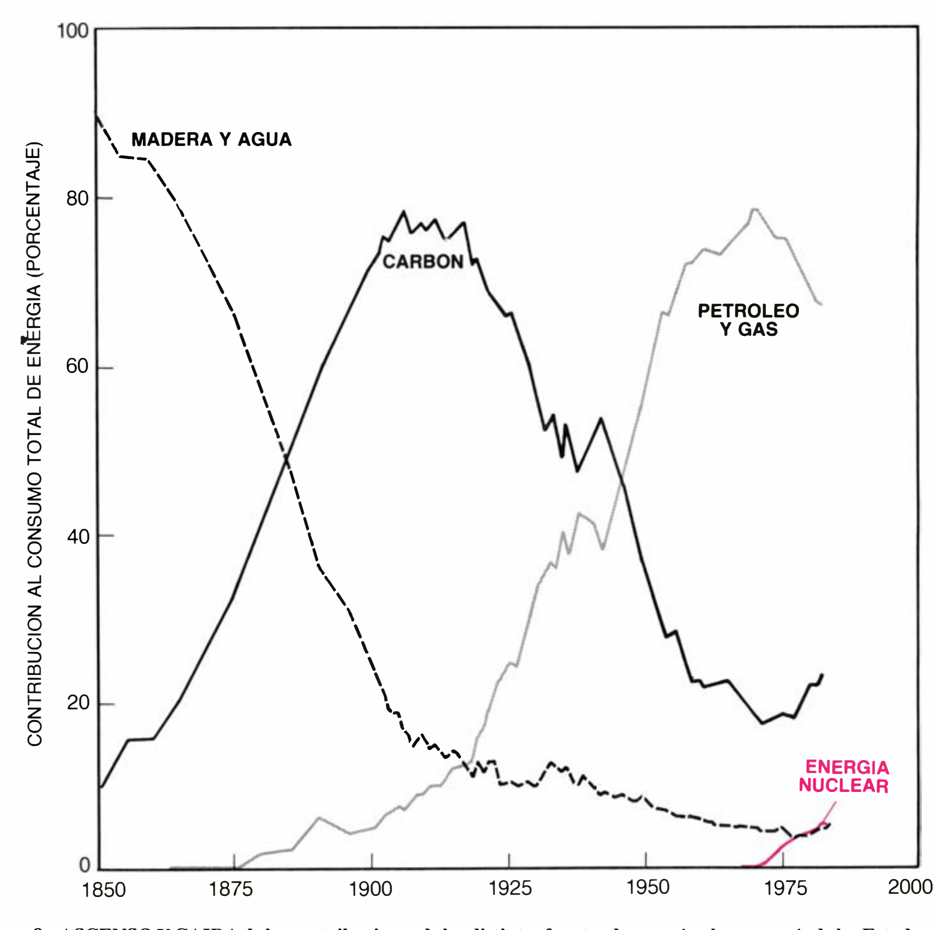
7. ESTRUCTURA DE DOS MINERALES, la circonolita (*izquierda*) y la perovskita (*derecha*), a partir de las cuales se cayó en la cuenta de que las mezclas sintéticas de mineras quizá pudieran facilitar la deposición permanente de residuos radiactivos. Ambos productos son extremadamente insolubles. Por otra parte, se conoce su capacidad de retener átomos de los elementos radiactivos uranio y torio durante intervalos temporales de escala geológica. La idea, propuesta por Alfred E. Ringwood, de la Universidad Nacional Australiana, es incorporar los residuos radiactivos a dichos minerales; los átomos radiactivos sustituirían al circonio en la circonolita (*púrpura*) y al calcio en la perovskita (*amarillo*). Seguidamente, los minerales se vitrificarían para obtener una cerámica.

Los óxidos hidratados de titanio, niobio, tántalo y circonio dan fe de los esfuerzos que se están realizando para encontrar mejores catalizadores. Tales compuestos actúan de estructuras de soporte de los metales catalíticos, como el paladio, platino, molibdeno y níquel. Esos compuestos participan en un intercambio iónico en el cual un ion metálico del compuesto (por ejemplo un ion sodio) se remplaza por un ion catalítico (por ejemplo platino). El proceso subsiguiente rinde pequeños agregados del compuesto, que presentan una distribución uniforme de los iones catalíticos.

Estos agregados, en efecto, parecen capaces de reducir drásticamente la temperatura y la presión requeridas en el primer paso de la licuefacción del carbón: la hidrogenación del carbón triturado y suspendido en un disolvente hidrocarburo. Sin embargo, aún se cuestiona la estabilidad a largo plazo de los agregados catalíticos. Por definición, los catalizadores no se consumen en la reacción química que facilitan. Sin embargo, están expuestos a la desactivación por parte de los productos químicos presentes en el carbón, especialmente el azufre. El catalizador debe entonces regenerarse o sustituirse.

Cabe una opción alternativa: diseñar el catalizador para que resista la desactivación. El proceso de intercambio iónico permite incorporar a los agregados diferentes tipos de iones activos, en la proporción deseada. Tal flexibilidad en la fabricación de los agregados posibilitará el desarrollo de catalizadores de larga vida.

La contribución que los materiales han aportado y continuarán aportando a la captación, manipulación y utilización de la energía resulta de importancia decisiva en una economía industrial; la historia de dichas economías demuestra una elevada correlación entre el consumo de energía y el nivel de vida. Somos optimistas y creemos que las futuras innovaciones de los materiales permitirán el suministro de energía en cantidades adecuadas para que persista la mejora del bienestar económico en Occidente y en el mundo entero.



8. ASCENSO Y CAIDA de las contribuciones de las distintas fuentes de energía a la economía de los Estados Unidos. Demuestran que cualquier nueva fuente de energía tarda décadas en constituirse en parte importante del total. Por ejemplo, el carbón tardó décadas en superar a la madera, viento y agua. Sin duda, dicha exigencia seguirá dándose en las futuras fuentes de energía: células solares fotovoltaicas o fusión nuclear. Cuando el petróleo y el gas se agoten, tendrán que encontrarse nuevas fuentes de energía. Para el desarrollo de esas fuentes resultará esencial disponer de materiales especializados. La fuente de energía hoy más controvertida, la fisión nuclear, aporta sólo el cinco por ciento de la demanda energética norteamericana.



Materiales para la medicina

Nuevos polímeros, cerámicas, cristales e híbridos son algunos de los materiales utilizados por los ingenieros médicos para fabricar sustitutos innovadores y cada vez más biocompatibles con los tejidos humanos lesionados

Robert A. Fuller y Jonathan J. Rosen

Cuando se plantea la necesidad de remplazar una parte defectuosa del cuerpo humano, muchos médicos desecharían la utilización de un sustituto artificial en favor del trasplante de un tejido compatible de donante humano. Después de todo, los tejidos y órganos naturales contienen la proporción justa de materiales necesaria para satisfacer las funciones del organismo. Sin embargo, la realización de un trasplante no se cuenta siempre entre las opciones posibles.

Para paliar en parte la necesidad de injertos vivos, muchos investigadores están empeñados en el desarrollo de órganos y tejidos artificiales; esfuerzo que ha resultado particularmente fructífero en las últimas décadas. Entre los factores que han contribuido al éxito citemos el gran impulso en la investigación, iniciada en la década de 1950, sobre biomateriales, sustancias no farmacológicas apropiadas para su inclusión en sistemas que potencian o sustituyen las funciones de los órganos y tejidos corporales.

Los biomateriales actuales se prestan a múltiples aplicaciones, desde la sustitución de lentes intraoculares hasta corazones artificiales. Tan importante ha sido el progreso, que no habrá lugar aquí para describir la mayoría de los muy prometedores sistemas y materiales que ya existen en el mercado, o que se encuentran en fase de investigación. Nos limitaremos, por tanto, a algunos ejemplos de los sistemas médicos que se han beneficiado del desarrollo de los nuevos materiales, o de la reciente aplicación de materiales originariamente destinados para usos ajenos a la medicina.

Antes de describir las aplicaciones de los materiales específicos hemos de señalar que los investigadores que desarrollan los biomateriales deben afrontar un reto fundamental: para que una sustancia constituya un biomaterial apto, no sólo debe resultar mecánicamente satisfactoria, sino también biocompatible, es decir, debe interactuar con el hospedador de forma no tóxica, controlable y predecible.

En un principio, los investigadores biomédicos se centraron en el desarrollo de materiales con baja reactividad con los tejidos y que provocaban una reacción mínima. El comportamiento inerte constituye aún un objetivo importante para muchos propósitos, pero no hay nada totalmente inerte en el cuerpo. Más aún, los investigadores admiten que no todas las reacciones entre los materiales extraños y el organismo son necesariamente perjudiciales. Por supuesto, se descartan aquellos que provocan inflamaciones o una reacción de rechazo. En cambio, se valora cada vez más algunos materiales muy interactivos. Por ejemplo, varios materiales de implantación forman enlaces químicos con el tejido circundante, lo que estabiliza el implante. Otros materiales los resorbe (es decir, se descomponen y se absorben) gradualmente el organismo cuando dejan de cumplir su finalidad inicial.

Un campo que se ha beneficiado notablemente de los avances de la ciencia de los materiales es el del desarrollo de elementos remplazables para el sistema cardiovascular. Algunos de los materiales que han contribuido a los éxitos alcanzados en él son totalmente inertes, mientras que otros son interactivos; todos ellos deben satisfacer requisitos mecánicos y de biocompatibilidad muy exigentes. El corazón normal late aproximadamente 40 millones de veces al año. En consecuencia, las partes artificiales diseñadas para bombear la sangre (por ejemplo, las cavidades de los dispositivos de asistencia cardiaca) deben fabricarse con materiales capaces de mantenerse flexibles sin desgarrarse ni deformarse.

Los materiales que permanecen en contacto con el flujo sanguíneo han de cumplir, además, otros requisitos: no dañar las células de la sangre ni provocar la formación de trombos sanguíneos. Cuando el flujo sanguíneo establece contacto con un material extraño, resulta inevitable la deposición de proteínas y de células de la sangre sobre dicho material. Si el proceso persiste, el coágulo, o trombo, puede entorpecer la función del dispositivo. Tales coágulos pueden también taponar los vasos sanguíneos en el lugar del implante, o desprenderse, provocando bloqueos vasculares o lesiones hísticas en lugares distantes, así el cerebro o el corazón.

Ningún material sintético satisface todos los requisitos mecánicos y de compatibilidad sanguínea del sistema cardiovascular, pero varias sustancias han demostrado ya su utilidad. Se han empleado en sistemas terapéuticos siliconas modificadas químicamente para evitar la adherencia de las proteínas y lípidos del plasma; su resistencia y duración son, sin embargo, limitadas. Los polímeros derivados del poliuretano poseen características mecánicas mejores; en algunos casos, su flexibilidad

1. INTERFASE entre el hueso de una tibia de rata (*izquierda*) y la superficie de un implante de "biovidrio" (*derecha*). No requiere sutura, porque el hueso se une directamente al implante. (La zona oscura que se observa más hacia la izquierda es la médula ósea.) Tras su implantación, el biovidrio desarrolla en su superficie capas ricas en fosfato cálcico (*junto al hueso*) y en sílice (*extremo derecho*). El fosfato cálcico del hueso se une al fosfato cálcico del implante y el colágeno producido por los osteoblastos (células del hueso) de la zona se incorpora a la superficie del vidrio. La unión entre el hueso y el implante estabiliza a éste y evita su desprendimiento a largo plazo. En primera instancia, los ingenieros biomédicos preferían implantar materiales inertes para la implantación, pero los materiales "bioactivos", o interactivos, están suscitando cada vez más interés para determinados propósitos. Entre éstos cabe citar los materiales y vidrios cerámicos.

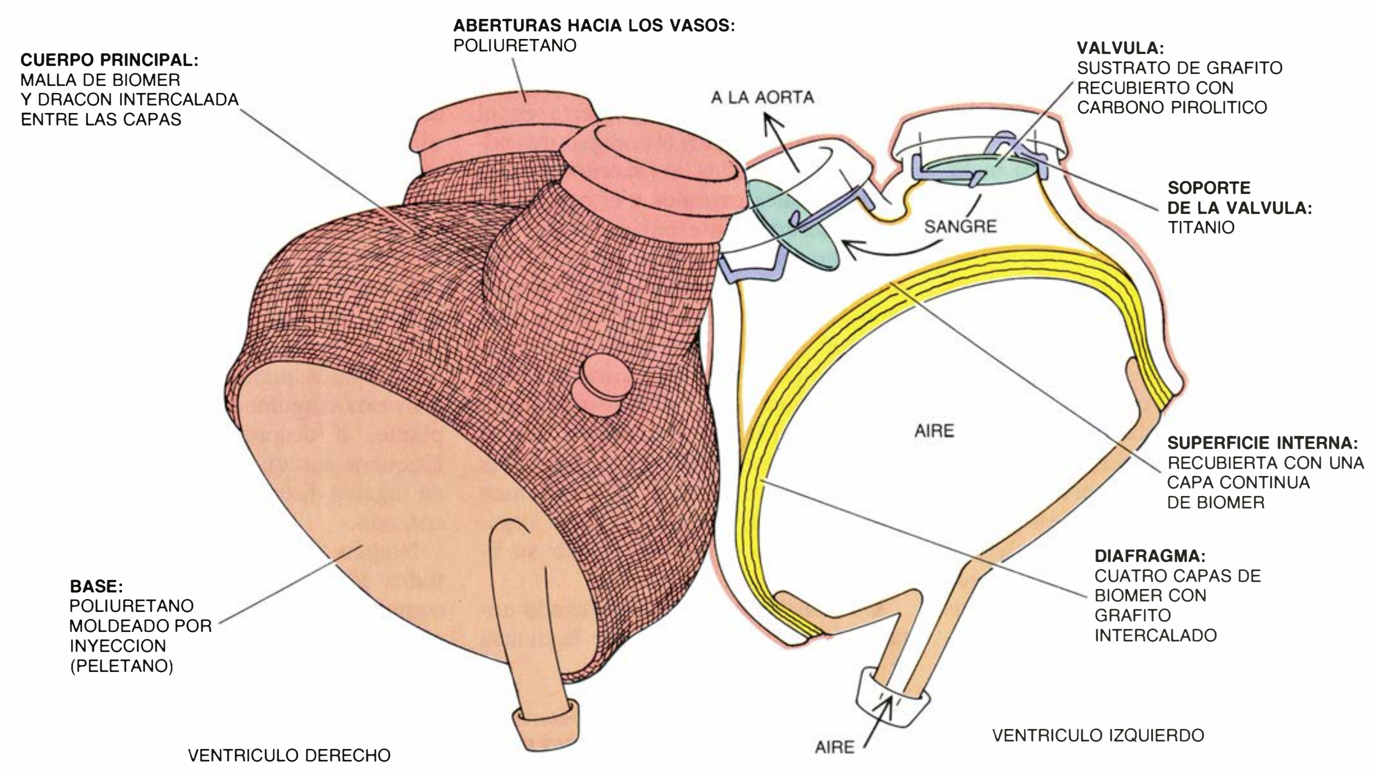
y duración son extraordinarias. Varios poliuretanos son también totalmente compatibles con la sangre; ese es el caso del Biomer, un material con base de poliéter y desarrollado para su aplicación en medicina por Ethicon, de Somerville, New Jersey. Un material de carbono puro vitrificado, desarrollado originalmente para encapsular el combustible de los reactores nucleares (el carbono pirolítico) constituye un elemento opcional altamente resistente y compatible con la sangre, adecuado para ciertas aplicaciones que no requieran flexibilidad. Además de ser inerte en el organismo, el carbono pirolítico opone especial resistencia al desgaste y a la fatiga.

En los últimos 30 años, las prótesis valvulares cardiacas, que han experimentado muchos cambios de diseño, han puesto a prueba la biocompatibilidad y la duración de muchos materiales nuevos. Las primeras válvulas mecánicas se fabricaban con acero inoxidable y caucho de silicona; su duración era razonable, pero requerían un tratamiento anticoagulante para prevenir la formación de coágulos de sangre. A finales de los años 60 se introdujo un nuevo modelo: tejidos animales modificados químicamente. El tratamiento anticoagulante que necesitaban esas válvulas era mínimo o nulo, pero solían durar menos. Recientemente se han fabricado algunas válvulas con carbono pirolítico, para conferirles una sólida resistencia mecánica y mayor compatibilidad con la sangre. Las válvulas del corazón artificial Jarvik-7 contienen ese carbono. Ni siquiera los más avanzados diseños de válvulas cardiacas están completamente libres de problemas; persiste, por tanto, la búsqueda de diseños y materiales ideales.

Los dispositivos para asistencia del ventrículo izquierdo del corazón, muchos de los cuales se encuentran aún en desarrollo, utilizan también una amplia gama de nuevos materiales. Esas bombas temporales alivian el esfuerzo del corazón insuficiente, ayudando a mantener el flujo sanguíneo normal. De particular interés en estos mecanismos son los materiales para la cavidad que acoge la sangre en el corazón y la bombea hacia la aorta. Algunos investigadores diseñan cavidades cuyas superficies en contacto con la sangre son especialmente lisas, bañándolas con Biomer o con un material gelatinoso desarrollado en la Fundación Clínica Cleveland.

Otros científicos ensayan cavidades de material texturado, como el poliuretano, que presenta fibrillas en su superficie. Las superficies de contacto texturadas pretenden "confundir" a la sangre para que produzca una pseudoíntima, una aproximación estable y biológica del revestimiento natural. Cuando la sangre entra en contacto con una de esas superficies grumosas, las proteínas del plasma se adhieren al material, y también lo hacen las plaquetas y la fibrina, que atrapa a las células de la sangre. A continuación, los fibroblastos se alojan en la capa en formación y sintetizan colágeno, una proteína fibrilar que se encuentra en el tejido conjuntivo de todo el cuerpo, incluidos los tejidos vasculares, los huesos, los tendones y los ligamentos. Finalmente, el depósito de colágeno forma una superficie lisa y biológicamente estable. En la última década, los científicos han desarrollado un planteamiento similar para fabricar vasos sanguíneos artificiales. En esta línea, se preparan vasos de politetrafluoroetileno (PTFE), un polímero susceptible de estiramiento para aumentar su porosidad. Los poros favorecen la adhesión de las proteínas del plasma sobre la superficie, dando lugar a la formación de una pseudoíntima.

Son múltiples, por tanto, los sistemas que facilitan la circulación de la sangre.



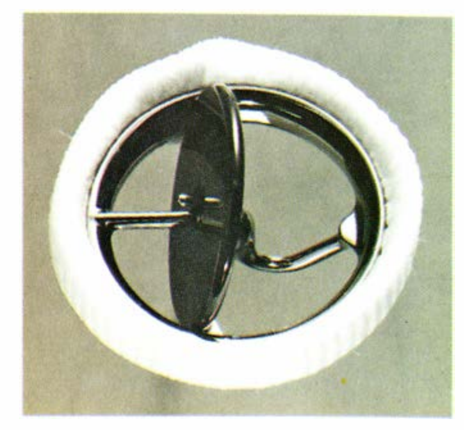
2. CORAZON ARTIFICIAL JARVIK-7, que se ha beneficiado de los avances en el desarrollo de polímeros. El corte muestra el interior del ventrículo izquierdo durante la sístole. La entrada de una corriente de aire fuerza la expansión del diafragma y envía la sangre que llena la cavidad superior hacia la aorta. El poliuretano Biomer, que es inerte, flexible y duradero, constituye un componente principal del recinto y del diafragma. También al interior de la cavidad se vierte Biomer líquido, para formar una superficie lisa e ininterrumpida de contacto con la sangre. La base y las aberturas superiores se fabrican con otros poliuretanos. El poliéster dacrón confiere rigidez al recinto. Entre los materiales no poliméricos se utiliza el grafito para lubricar el diafragma y dar forma a los discos de la válvula, el carbono pirolítico para fortalecer y vitrificar los discos y el titanio para fabricar un armazón duradero y no corrosivo para dichos discos.

¿Qué decir de la propia sangre? Hasta la fecha, los sustitutos sintéticos de la misma sólo alcanzan a desempeñar parte de sus variadas funciones vitales. Diversos polímeros esencialmente inertes, como la polivinilpirrolidona, sustancia soluble en agua, restablecen el volumen de la sangre, por lo que pueden emplearse en la prevención o tratamiento del shock, es decir, del fallo circulatorio que se produce por la pérdida de líquido de los vasos sanguíneos. Otro tipo de polímeros, los perfluorocarbonos (que poseen un átomo de carbono por cada átomo de flúor) son capaces de transportar oxígeno directamente. Por lo que, en potencia, servirían para tratar la anemia y otras alteraciones que se caracterizan por la presencia de niveles inadecuados de oxígeno en la sangre; por ejemplo, la isquemia hística: déficit de sangre en un tejido provocado por la obstrucción de un vaso sanguíneo. Ciertos derivados de la hemoglobina, la molécula que en condiciones normales transporta el oxígeno en los glóbulos rojos de la sangre, pueden también desempeñar esa tarea.

El primer perfluorocarbono sustitutivo de la sangre, el Fluosol, hecho de perfluorodecalín y perfluorotripropilamina, posiblemente sea el más conocido, pero su utilización en el tratamiento de la isquemia no ha dado el rendimiento esperado. Algunos compuestos de perfluorocarbono más recientes presentan mayor capacidad de transporte de oxígeno (en muchos casos, mayor incluso que la de la propia hemoglobina); quizás en el futuro algunos de esos materiales encuentren aplicación en nuevos tratamientos médicos.

Citemos, de paso, el uso posible de los perfluorocarbonos en el tratamiento de urgencia de los ataques de isquemia, episodios de interrupción del riego sanguíneo del cerebro. En esos ataques, las células del cerebro, humano o de animales, pueden morir, provocando así una lesión permanente. Pero si mediante algún fluido se aportan nutrientes y oxígeno al cerebro hasta que la sangre lo haga de nuevo, se protegerán las funciones normales del cerebro.

Jewell L. Osterholm y sus colaboradores, de la Facultad de Medicina Jefferson de Philadelphia, han desarrollado uno de esos fluidos, ensayado con éxito en animales que habían padecido graves ataques de isquemia. El fluido de prueba contenía nutrientes y, para suministrar oxígeno, perfluorocarbonoperfluorobutiltetrahidrofurano. Los investigadores bañaron el cerebro con ese compuesto, administrándolo a través del cráneo con un catéter. Sorprendentemente, animales que presentaban un electroencefalograma plano, el criterio común para diagnosticar la muerte cerebral, revivieron; subsiguientemente esos animales mostraban patrones electroencefalográficos aparentemente normales. Si otros tratamientos similares tienen éxito en seres humanos, se abrirá la posibilidad de reducir los efectos de una de las principales causas de muerte e incapacidad.



3. VALVULA Medtronic Hall del corazón artificial Jarvik-7, cuyas superficies son lo bastante suaves para impedir la formación de coágulos sanguíneos. La cubierta blanca es un anillo de costura que une la válvula al corazón natural; en el Jarvik-7 esa cubierta se suprime, pues no resulta necesaria.

Mientras que la mayoría de materiales para el sistema cardiovascular deben ser elásticos y compatibles con la sangre, los materiales utilizados para los implantes óseos tienen que ser rígidos y resistentes a la carga. Además, es deseable que los implantes óseos residan en el hueso, sin obstruir el proceso de remineralización ósea, mecanismo éste mediante el cual el cuerpo repone el hueso. En ciertos casos, como la reparación de huesos largos o de dientes, el implante ideal debe facilitar la regeneración del hueso lesionado, disolviéndose al tiempo que se produce el nuevo tejido óseo que ocupa su lugar.

Las prótesis metálicas constituyen, desde hace tiempo, el pilar principal de ortopedas y dentistas. Hoy mismo, muchos de los implantes dentales, de articulaciones y de huesos largos contienen titanio o aleaciones de cromo y cobalto. Uno de los más recientes tipos de prótesis dentales permanentes está hecho con varillas de titanio que se implantan en el hueso subyacente; los dientes de sustitución se sujetan luego a las varillas.

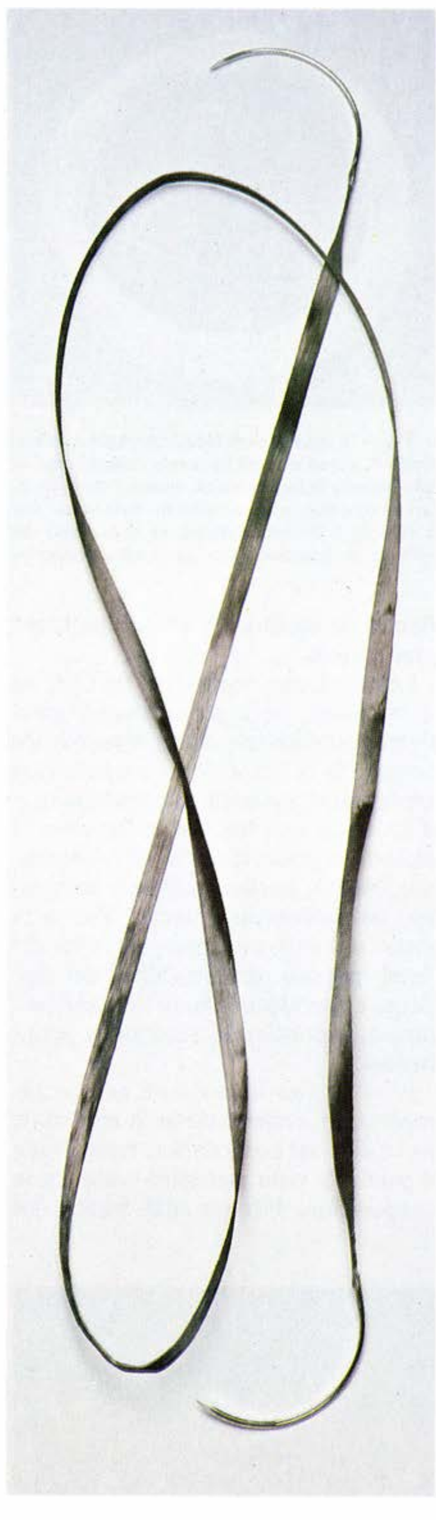
Los implantes metálicos, fuertes, no se fracturan, pero presentan inconvenientes potenciales. Aunque uno de los riesgos (la corrosión) ha perdido hoy importancia, los implantes metálicos, o el cemento que los fija en su sitio (a menudo el polímero polimetil-metacrilato, PMMA), pueden provocar reacciones de inflamación local. Por otra parte, al menos en teoría, los iones del metal pueden desprenderse del implante e introducirse en el torrente sanguíneo, produciendo reacciones perjudiciales.

Pero lo más importante es que los implantes metálicos difieren mucho de los tejidos del hospedador, tanto desde el punto de vista mecánico como en su composición. Por ser más fuertes los





4. UN MATERIAL CON TEXTURA, un poliuretano de superficie recubierta con fibrillas (*izquierda*), se está ensayando para que actúe de superficie de contacto con la sangre en algunos dispositivos de asistencia ventricular. A diferencia de las superficies suaves, las texturadas se diseñan para atrapar y retener diversos componentes del flujo sanguíneo. Cuando el material entra en contacto con la sangre (*derecha*), las fibrillas atrapan material sanguíneo, así como plaquetas, proteínas, hematíes (*discos*) y glóbulos blancos. La matriz de células y proteínas resultante se transforma en una capa pulida y delgada. En última instancia, la capa queda cubierta por colágeno (una proteína) y se estabiliza. Si todo va bien, se crea una superficie de contacto con la sangre análoga a la de los vasos sanguíneos naturales, lo que evita la aposición de coágulos.





5. **FILAMENTOS DE CARBONO constituidos por 10.000 fibras de ese material, revestidas con ácido poliláctico. Constituyen un material de implante fuerte, elástico y manejable para la reparación de tendones y ligamentos. Desarrollado por Harold Alexander y J. Russell Parsons, de la Universidad de Medicina y Odontología de New Jersey en Newark, el material se teje en el interior y alrededor del tejido lesionado. Al cabo de dos semanas, el organismo absorbe el ácido poliláctico y lo sustituye por células que empiezan a producir tejido conjuntivo nuevo. Entre nueve meses y un año después, el nuevo tejido rodea las fibras implantadas. En la microfotografía, ampliada 400 diámetros, se muestra la sección transversal de un ligamento a los 11 meses de la implantación de las fibras de carbono (túbulos).**

metales que el hueso natural, tienden a soportar directamente la mayor parte de algunas de las cargas que aguanta el hueso. En circunstancias normales, la carga ejercida sobre el hueso le estimula a crecer. Y como el implante "protege" de la carga, puede producirse resorción del hueso, aflojándose posteriormente el implante. De hecho, pocos implantes metálicos aguantan más de 20 años, por lo que resultan inapropiados para la gente joven. El aflojamiento se mitiga proporcionando a los implantes una superficie de metal poroso que permita el crecimiento del hueso en su interior y su adhesión a la prótesis. Desgraciadamente, esa unión no impide siempre la pérdida de hueso por resorción.

Con la esperanza de aumentar la vida de los implantes, algunos científicos han venido ensayando, a lo largo de los últimos quince años, con sustitutos óseos de materiales inertes no metálicos. Así, algunos se han ocupado de la utilización de polímeros reforzados con fibras fuertes de carbón; este tipo de implante parece transferir la carga al hueso inmediato, evitando una pérdida excesiva de tejido óseo. Varios laboratorios han desarrollado también distintos materiales cerámicos, vítreos y vitro-cerámicos, todos ellos "bioactivos" (interactivos), que forman enlaces químicos entre su superficie y el hueso adyacente y, según se cree, estimulan la formación de hueso nuevo.

Los materiales de superficie activa conocidos como "biovidrios" fueron las primeras sustancias que mostraron capacidad de establecer enlaces químicos con el hueso. En los "biovidrios", desarrollados por Larry L. Hench, de la Universidad de Florida en Gainesville, parte de la sílice que contiene el vidrio convencional se sustituye por calcio, fósforo y sodio, todos ellos componentes del hueso natural. Los materiales cerámicos de fosfato de calcio, otra clase de materiales con superficie activa, se enlazan también con el hueso y se utilizan ampliamente para reconstruir o reparar el hueso maxilar. En el futuro, los materiales cerámicos de fosfato de calcio quizá constituyan los sistemas sintéticos más biocompatibles para la sustitución del tejido duro. Se ha comprobado que esos materiales cerámicos no provocan respuesta inflamatoria ni de rechazo por parte del organismo, se unen firmemente al hueso, al parecer mediante mecanismos de cementado normal, y no dificultan la deposición natural de minerales en el hueso circundante.

Muchos investigadores confían en que los materiales cerámicos de fosfato de calcio, los biovidrios y las vitrocerámicas (vidrios a los que se ha conferido más resistencia mecánica por crecimiento de cristales en su interior) desempeñen en el futuro un papel importante en ortopedia y en la reparación dental. Sin embargo, los materiales no metálicos pueden fracturarse ante la tensión de las cargas. Por tanto, en los años venideros, muchos implantes resistentes a la carga podrían estar formados por sustratos metálicos mezclados o revestidos con materiales bioactivos de cerámica, vidrio o vitrocerámica. Podrían fijarse en su sitio mediante materiales que indujeran el sellado normal de hueso a hueso, en lugar del cemento que se utiliza hoy. Varios laboratorios se esfuerzan por desarrollar esa combinación.

Algunos materiales nuevos ofrecen perspectivas especialmente prometedoras para su aplicación en odontología; en concreto, para la restauración estética de los dientes. Entre esos materiales se cuentan ciertos compuestos con base de porcelana y de polímeros, todos ellos muy resistentes a la fractura y al aflojamiento. Pueden colorearse para imitar los dientes normales del paciente, son resistentes a las manchas y resultan apropiados para rellenar cavidades, reparar la corona dentaria y recubrir las imperfecciones de la superficie.

Las porciones no óseas del sistema musculoesquelético se han beneficiado también de los avances registrados en tecnología de los biomateriales. En particular, los nuevos biomateriales mejoran la reparación de ligamentos y tendones: fibras elásticas y resistentes que unen, respectivamente, el hueso al hueso y el músculo al hueso o al músculo. Varios de los materiales en estudio o ya en uso se desarrollaron originariamente para propósitos ajenos a la medicina; entre ellos, un polímero similar al caucho, el kevlar (revestido con silicona para mejorar la biocompatibilidad), la fibra de poliéster da-

crón, los polímeros PTFE y las fibras de carbono pirolizado que se obtienen calentando fibras de rayón hasta que sólo quedan las cadenas de carbono. Todos esos materiales pueden utilizarse por separado, pero ninguno resulta ideal para reparar tendones o ligamentos. Por ejemplo, el dacrón no es tan resistente como el kevlar, pero estimula el crecimiento de tejido nuevo; las fibras de carbono, resistentes, pueden ser quebradizas.

El inconveniente de los implantes de fibra de carbono podría superarse con el material híbrido desarrollado por J. Russell Parsons, Harold Alexander y sus colaboradores, de la Universidad de Medicina y Odontología de New Jersey en Newark, quienes implantan fibras de carbono pirolizado revestidas, cada una, con ácido poliláctico; es éste un polímero flexible, aunque no particularmente fuerte, del ácido láctico (el ácido láctico se produce de forma natural en el organismo). El híbrido es bastante resistente, lo que no impide que el cirujano lo maneje con facilidad.

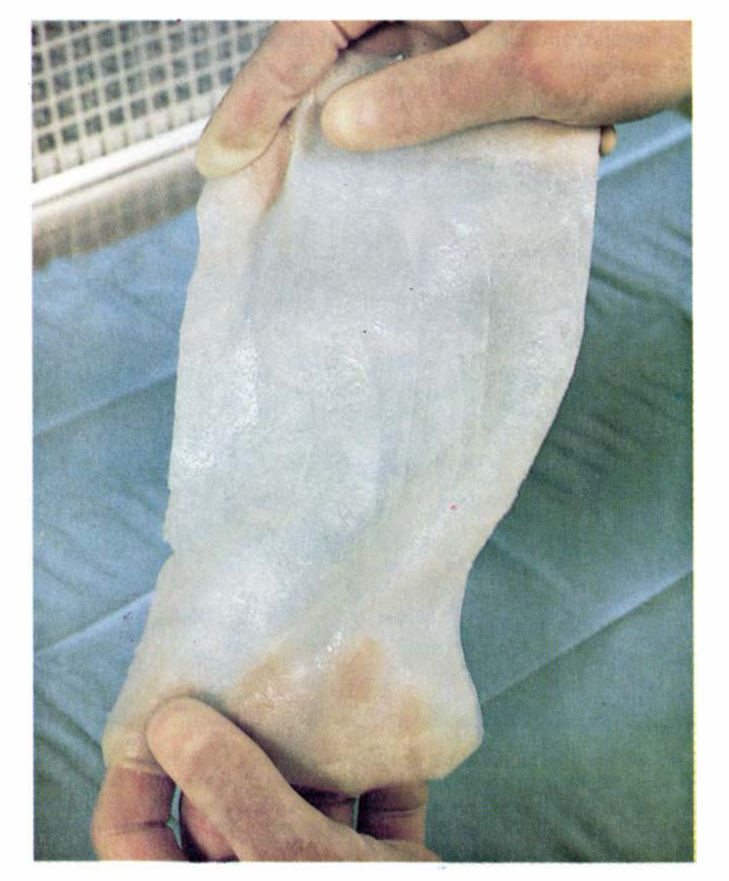
En un plazo aproximado de dos semanas tras la implantación de 10.000 fibras finas en el tendón o ligamento lesionado, el cuerpo absorbe el ácido poliláctico y lo remplaza por células que producen colágeno. Con el tiempo, el tejido conjuntivo recién formado crece alrededor de la estructura de carbono. Algunas investigaciones recientes sugieren que puede desarrollarse una forma de ácido poliláctico suficientemente fuerte y estable para sustituir carbono y soportar la tensión que sufran los tendones y ligamentos durante el período de recuperación. Cuando su presencia resulte ya innecesaria, el polímero se resorberá y no quedarán restos de material extraño que puedan provocar inflamaciones u otras reacciones adversas.

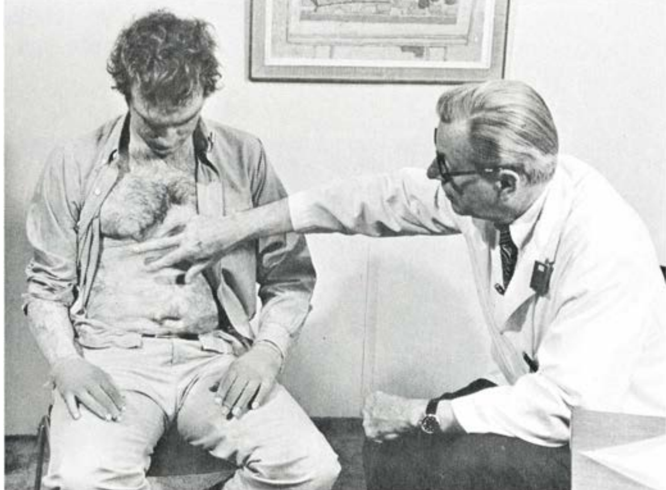
También para la piel humana vienen buscando los investigadores desde hace tiempo sustitutos sintéticos, que revisten especial importancia en el caso de personas que han sufrido quemaduras graves y de gran extensión. La piel, que colabora activamente en la defensa contra la infección y en la retención de agua y electrolitos, consta de dos capas principales. La inferior, la dermis, contiene tejido conjuntivo denso, así como folículos pilosos, nervios y vasos sanguíneos; la superior, la epidermis, presenta varias subdivisiones y componentes, entre los que se cuenta la queratina, una proteína resistente al agua.

Durante muchos años, los científicos han experimentado con sustitutos poliméricos de piel normal. Hasta hace poco, esos sustitutos no podían impedir la aparición de infecciones y estaban sujetos a reacciones de rechazo. Sin embargo, en los últimos años, varios laboratorios han producido nuevos materiales con resultados muy positivos en la sustitución de la piel, muchos de los cuales se encuentran ya en una fase avanzada de prueba.

En el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), Ioannis V. Yannas y sus colaboradores han fabricado un sustituto biodegradable de la piel, conocido por piel de estadio 1, capaz, al parecer, de estimular el crecimiento de piel nueva. El componente estructural del material es un polímero poroso derivado de las fibras de colágeno de bovino. Se combina el polímero con sulfato de condroitina-6, un polisacárido extraído del cartílago de tiburón, para reducir el ritmo de degradación del colágeno por parte del hospedador. Finalmente, se recubre el material con caucho de silicona para prevenir la infección y la pérdida de líquidos.

Cuando los médicos han suturado en su sitio la nueva "piel", los fibroblastos procedentes del tejido conjuntivo subyacente emigran hacia ella. Las células producen una "neodermis". Al cabo de unas tres semanas, cuando el polímero de colágeno ya está muy degradado, se retira la silicona y sobre la neodermis se implantan pequeños fragmentos de epidermis tomados del mismo paciente; al cabo de algunos días se forma una nueva epidermis. Al igual que sucede con otros sustitutos, la nueva piel funciona de forma idéntica a la piel na-





6. PIEL ARTIFICIAL DE ESTADIO 1 (*izquierda*), desarrollada por Ioannis V. Yannas, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, fabricada con un polímero de colágeno de bovino y un polisacárido que reduce el ritmo de degradación del colágeno por parte del organismo receptor. Cuando el material se sutura, las células del receptor emigran al lugar del implante y forman una nueva dermis; a continuación, los cirujanos transplantan células epidérmicas del propio receptor sobre la superficie, facilitándose el crecimiento de una nueva epidermis. En 1981, John F. Burke, del Hospital General de Massachusetts, aplicó piel de estadio 1 en el abdomen de Mark Walsh, un electricista que había sufrido quemaduras de tercer grado en la mayor parte del cuerpo. La piel que creció (*derecha*) parece normal, de no ser por la ausencia de vello y de glándulas sudoríparas. Está ya en estudio una piel de estadio 2 sobre la que se siembran células epidérmicas antes de su implantación, para acelerar la curación.

tural, pero no posee folículos pilosos ni glándulas sudoríparas. Frederick H. Silver, de la Universidad de Medicina y Odontología de New Jersey en Piscataway, ha fabricado también una matriz de colágeno de bovino; opina que llegará el día en que esas matrices podrán recubrirse con fármacos anticancerosos y aplicarse en zonas del cuerpo de las que se haya extirpado tumores malignos, reduciéndose potencialmente las dosis quimioterápicas que precisan esos enfermos.

Otros investigadores, así Howard Green y sus colaboradores, de la Facultad de Medicina de Harvard, estudian un modo distinto de sustituir la piel: cultivos de tejido. El grupo de Green parte de una muestra, de piel del receptor, de sólo un centímetro cuadrado. Cultivan las células epidérmicas de la muestra en una mezcla de fibroblastos fetales inactivos, un factor de crecimiento epidérmico y un agente que aumenta la actividad metabólica de las células de la piel. Los fibroblastos proporcionan un molde para las células cutáneas en multiplicación, formándose una capa de epidermis nueva y estratificada que contiene queratina. Con material obtenido de ese modo, Green y sus colaboradores salvaron, en 1983, las vidas de dos hermanos, de seis y siete años de edad, que habían sufrido quemaduras en el 97 por ciento del cuerpo y que tenían más del 80 por ciento de la piel completamente destruida. Actualmente, ambos hermanos poseen piel funcional y de tacto suave.

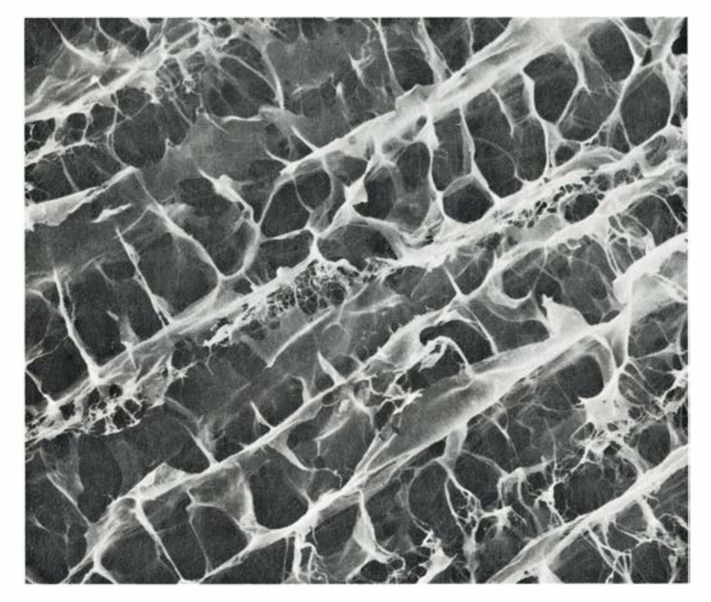
Las técnicas utilizadas en la producción de sustitutos de la piel pueden servir de modelo para sintetizar otros tejidos. A este propósito, Eugene Bell y sus colaboradores, del MIT, han fabricado, además de piel, una glándula tiroides sintética que cuando se implanta en ratas produce la hormona tiroglobulina. Para fabricar su equivalente de la piel, esos investigadores combinaron fibroblastos del receptor con una solución que contenía colágeno de rata, suero de rata y un medio de cultivo de tejidos. Pasado algún tiempo, el colágeno atrapa las células y se forma una matriz dermoequivalente. Generada la dermis, los científicos dispersan algunas células epidérmicas sobre ella, obteniéndose al cabo de pocos días una capa de epidermis. Para fabricar el tejido tiroideo, el grupo coloca células tiroideas, en lugar de fibroblastos, en la solución del cultivo.

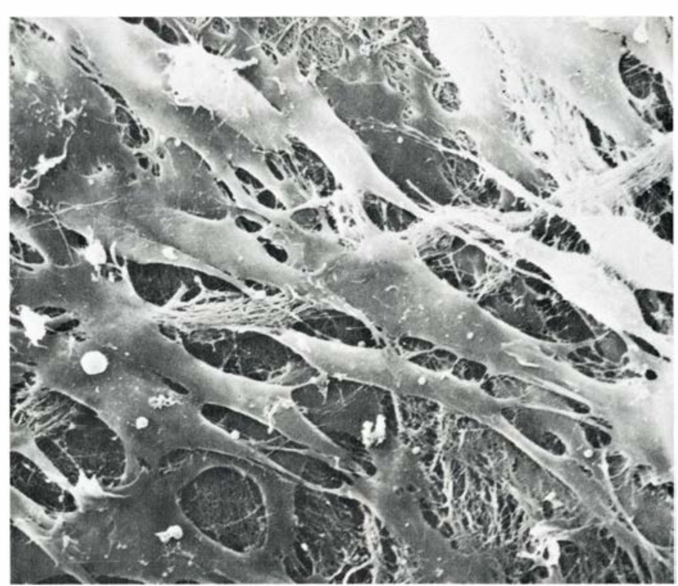
Bell espera también sintetizar un modelo de tejido pancreático cultivando células beta del páncreas, las células que sintetizan la insulina. Por su parte, el páncreas endocrino artificial que está perfeccionando Anthony M. F. Sun, de la Universidad de Toronto, se encuentra en una fase de desarrollo mucho más avanzada.

Un sustituto eficaz del páncreas podría aliviar a los miles de diabéticos que lo son por carecer de células beta funcionales. En la actualidad, se ven obligados a normalizar sus niveles de glucosa en sangre (así como otras anomalías metabólicas) administrándose diariamente una o más inyecciones de insulina. En el sistema de Sun, los islotes de Langerhans (grupos de células del páncreas que contienen las células beta) se encapsulan individualmente con un material híbrido formado por un polímero de un aminoácido y alginato de sodio, polímero polisacárido derivado de vegetales marinos.

El polímero de aminoácido proporciona la resistencia, mientras que el alginato de sodio aporta la estructura; combinados, forman una membrana que "oculta" los islotes extraños al sistema inmunológico del hospedador (dado que las moléculas del sistema inmunológico son demasiado grandes para atravesar la membrana), impidiéndose así el rechazo. Además, la membrana es lo bastante fuerte para resistir el implante por inyección y, al propio tiempo, lo bastante porosa para permitir que la insulina salga y que la glucosa entre en la cápsula. La glucosa estimula la liberación de insulina, del mismo modo que la elevación de los niveles de glucosa en sangre estimula la secreción de insulina por parte del páncreas de quienes no padecen diabetes. Una sola inyección de esas esferas microscópicas, de diámetros comprendidos entre los 300 y los 600 micrometros, ha controlado los síntomas de la diabetes durante más de un año en animales de laboratorio. Se espera que los ensayos clínicos correspondientes empiecen en los próximos dos o tres años.

Un último ejemplo de cómo ha contribuido el progreso de la ciencia de los materiales al desarrollo de sistemas de tratamiento con implantes es la evolu-





7. OTRA MATRIZ DE COLAGENO (*izquierda*) diseñada para estimular el crecimiento de piel nueva y que podría utilizarse para administrar fármacos anticancerosos. Se ha desarrollado en la Universidad de Medicina y Odontología de New Jersey en Piscataway. El colágeno se congela y se seca mediante un proceso que controla la porosidad de la matriz, que se vuelve transparente y esponjosa al mezclarla con agua. Tras disponer el material sobre una herida (*derecha*), sus cavidades acogen células de la piel normal (*bandas largas e irregulares*), que se acumulan alrededor de la matriz y acaban ocupando su lugar.

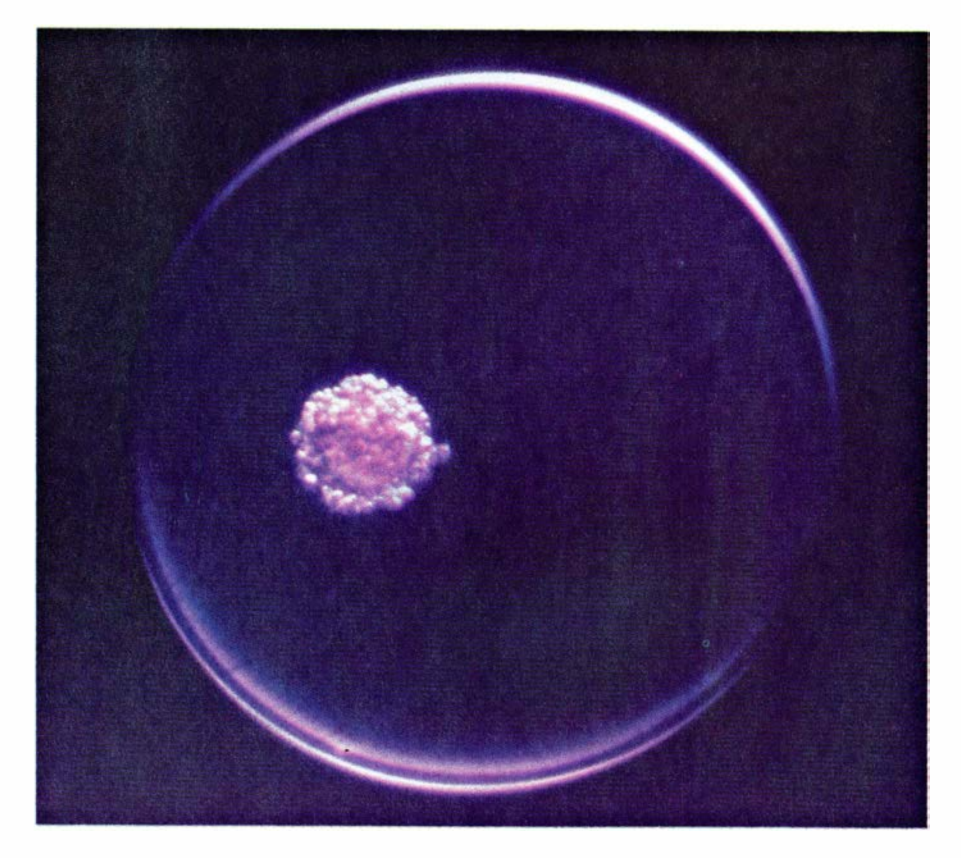
ción del implante de lentes intraoculares. En la década de 1940 un oftalmólogo británico observó que los fragmentos de los recubrimientos de plástico de la carlinga de los aviones fabricados con metacrilato de polimetilo no producían reacción, o apenas, cuando se incrustaban accidentalmente en los ojos del piloto. A los pocos años, esa observación conducía a las primeras implantaciones quirúrgicas de lentes PMMA en pacientes operados previamente de cataratas graves.

Durante 40 años se fabricaron implantes de lentes intraoculares con ese mismo material, hasta que, a principios de esta década, se modificó para evitar que las lentes se decoloraran por acción de la luz ultravioleta.

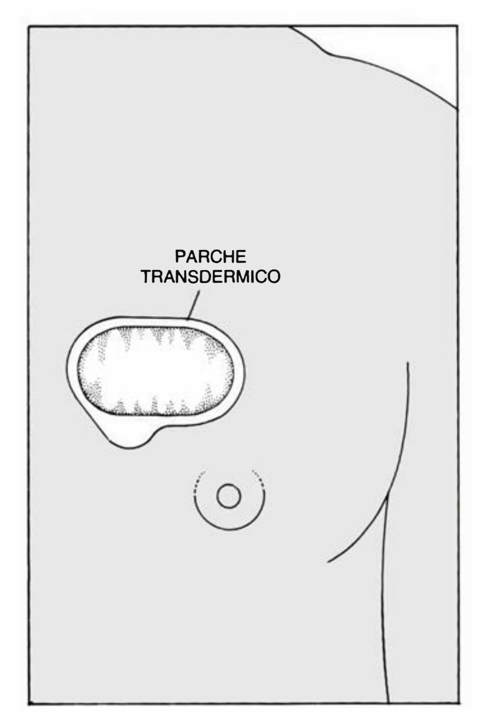
Más recientemente, los científicos han desarrollado lentes plegables, fabricadas con caucho de silicona o con hidrogel, un polímero viscoso similar a la gelatina. Estas nuevas lentes pueden implantarse en el ojo mediante una incisión mucho menor que la requerida por las lentes PMMA. Un laboratorio, al menos, está llevando esos avances todavía más lejos: desarrolla un material inyectable que se administraría en forma de líquido y polimerizaría después *in situ* para formar la nueva lente.

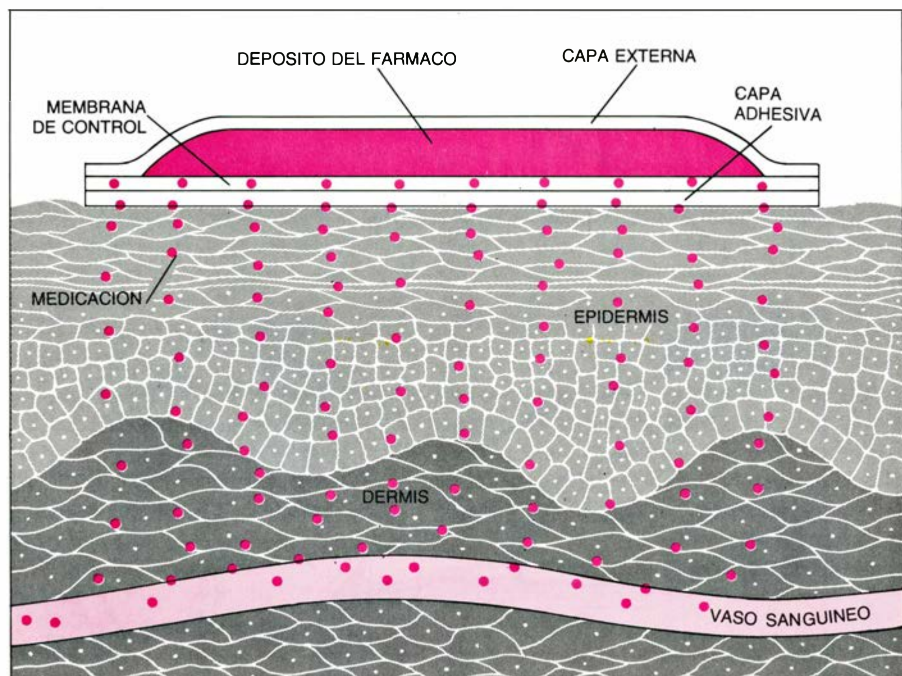
Los sistemas implantables constituyen probablemente las aplicaciones más espectaculares de los biomateriales, pero también son importantes aquellos sistemas que colaboran de otro modo en la administración del tratamiento médico. Por ejemplo, los moldes fabricados con polímeros rivalizan ya con los moldes de escayola en la fijación externa de los huesos. En los últimos años se han desarrollado materiales de poliuretano que poseen una combinación ideal de propiedades: son fuertes, poco pesados y resistentes al agua y a la rotura. Esos moldes permiten que los pacientes se muevan con mayor libertad y se bañen sin complicaciones posteriores.

La sutura, otra ayuda a la curación de heridas, constituye probablemente uno de los primeros intentos del hombre por transformar una sustancia natural en biomaterial. Bajo formas diferentes, con suturas de tripa viene cerrándose heridas desde el 175 a. de C.



8. MICROCAPSULA que rodea un islote pancreático de Langerhans. Se fabrica con dos polímeros: un polisacárido que proporciona la estructura y una proteína que le confiere resistencia. En circunstancias normales, los islotes pancreáticos contienen las células que producen la insulina, pero en los diabéticos han sufrido un proceso de destrucción o deterioro. El trasplante de tejido pancreático, el tratamiento obvio de la diabetes, ha resultado prácticamente ineficaz hasta la fecha, porque el sistema inmunológico del huésped reconoce los islotes implantados como extraños y produce anticuerpos contra ellos. Se ha demostrado, en animales diabéticos, que la cápsula de polímero actúa de barrera contra los anticuerpos, que son moléculas voluminosas. A la vez, la cápsula es suficientemente porosa para permitir que la insulina formada en los islotes salga de ella y desempeñe sus funciones hormonales normales. Los islotes encapsulados han controlado ya la diabetes en animales de laboratorio, pero todavía no han comenzado los ensayos clínicos en humanos.





9. PARCHES TRANSDERMICOS (*izquierda*) **desarrollados por la Corporación Alza. Contienen un depósito de nitroglicerina (para el tratamiento de la angina de pecho). Los parches se fabrican con varios polímeros, hasta diez, cada uno de los cuales se ha diseñado para llevar a cabo ciertas funciones. En un depósito típico** (*derecha*) **los polímeros forman la delgada membrana externa (que impide que el parche se deseque), el recipiente para el fármaco, la membrana que controla la dosis liberada y la capa adhesiva. Para alcanzar el torrente sanguíneo desde el parche transdérmico, la medicación** (*puntos*) **debe atravesar los poros de la membrana de control y de la capa adhesiva y difundirse a través de la epidermis, hasta los vasos sanguíneos de la dermis subyacente.**

Las sintéticas absorbibles, fabricadas con polímeros o copolímeros del ácido glicólico, han remplazado virtualmente a la tripa en años recientes. Esos polímeros provocan una reacción hística mínima y pueden fabricarse de calibre muy pequeño (hasta de un décimo del diámetro de un cabello humano), lo que ha permitido el desarrollo de la microcirugía. Otros polímeros, en especial el polipropileno, han sustituido por completo a los antiguos materiales de sutura utilizados en cirugía cardiovascular, pues no se absorben, son lisos y constan de un solo filamento que, dada su gran resistencia a la fragmentación, permite practicar suturas sin solución de continuidad cuando la rapidez reviste carácter decisivo.

En diversos campos de la farmacoterapia empiezan a tener gran repercusión los parches transcutáneos, que se adhieren a la piel y administran dosis controladas de medicación. Con estos parches se administra ya medicación para tratar el mareo, la angina de pecho y la hipertensión, y se está considerando su empleo en la administración de antihistamínicos, insulina, anticonceptivos e incluso algunos fármacos anticancerosos. Esos sistemas aparentemente simples pueden contener hasta diez polímeros diferentes, a cada uno de los cuales le corresponde una función distinta. La adhesión a la piel, la retención del sudor, el control de la dosis de fármaco administrado y el almacenamiento del mismo en un depósito especial son otras tantas funciones diferentes que llevan a cabo materiales con propiedades especializadas. Con vistas al futuro, muchos grupos de investigación están desarrollando sistemas transcutáneos de administración de fármacos capaces de liberar simultáneamente dos o más medicaciones en dosis diferentes.

No cabe duda de que en el futuro aparecerán aplicaciones cada vez más complejas de los materiales híbridos, bioactivos y biodegradables. El éxito en la aplicación de nuevos materiales dependerá, en parte, del progreso que registre el descubrimiento de sus propiedades, especialmente de las encerradas en las superficies. ¿Cómo se orientan las moléculas en la superficie, cuál es su composición y qué tipo de interacciones químicas se produce entre la superficie del material y el tejido vivo? Los últimos avances en las técnicas espectroscópicas están permitiendo a los científicos estudiar interacciones microscópicas entre los materiales y los tejidos, como el comportamiento de las proteínas cuando entran en contacto con las superficies de diversos materiales.

Paralelamente, el progreso en el desarrollo de los materiales se relacionará con los avances en fisiología, inmunología y biología celular que han aportado nueva información sobre los mecanismos implicados en la reparación de las heridas y en la coagulación de la sangre. La comprensión de esos procesos, y de otras acciones hísticas, junto con un mejor conocimiento de las interacciones entre la superficie y el tejido, ayudaría a los científicos a preparar materiales compatibles de creciente calidad y, por tanto, permitiría mejorar los tratamientos.

La obtención de materiales apropiados para los sistemas médicos ha sido siempre producto de una colaboración interdisciplinaria entre investigadores en ciencia de los materiales, bioingeniería, medicina clínica y diversas disciplinas biológicas básicas. Ese esfuerzo continuado ha dado ya sus frutos, no sólo en los sistemas diseñados para subsanar el fallo de órganos vitales, sino también para afrontar alteraciones menos graves. El trabajo se dirige también hacia el desarrollo de implantaciones y otros dispositivos que posibilitan la resolución de problemas médicos de índole crónica o incapacitadora. Estamos convencidos de que los nuevos sistemas de biomateriales seguirán contribuyendo al avance de todos los aspectos de las ciencias de la salud.



La ciencia de los materiales

La extraordinaria diversidad de los nuevos materiales responde a un mejor conocimiento de las técnicas para obtener estructuras dotadas de propiedades cada vez más eficaces y rentables

Gerald L. Liedl

Por el octavo milenio antes de nuestra era, los seres humanos descubrieron que un trozo de arcilla moldeado en forma de olla podía endurecerse al fuego y que el recipiente, una vez cocido, retenía el líquido y no se deformaba ni siquiera colocándolo sobre las brasas. Se había transformado un material blando y maleable en otro duro como una piedra. Esta primera transformación intencionada de un material inorgánico natural en otro dotado de nuevas propiedades fue el principio de la técnica e ingeniería de los materiales.

Unos 7000 años más tarde, los filósofos griegos especulaban sobre la posibilidad de que toda la materia estuviera constituida por diminutas partículas indivisibles de una misma entidad fundamental. Este primer intento por comprender la naturaleza íntima de las cosas que nos rodean puede considerarse el principio de la ciencia de los materiales.

Hasta épocas recientes, la ingeniería y la ciencia de los materiales permanecieron separadas por un ancho abismo. La elaboración artesana y la tecnología florecían. La selección, modificación y elaboración de los materiales acabaron siendo elementos fundamentales de la cultura humana. Por entonces, la ciencia de los materiales –el esfuerzo por desentrañar la naturaleza de los materiales y los efectos que sobre ellos tienen las diversas manipulaciones– no solía ir más allá del nivel de la especulación. Hubo que esperar hasta el siglo XIX para que la química, y la física en menor medida, empezaran a brindar el apoyo del cálculo moderno y las teorías aplicables a los problemas, en su mayor parte empíricos, con que se encontraban artesanos e ingenieros. A lo largo de los últimos cincuenta años, la colaboración se ha ido estrechando. Unas teorías más profundas y la moderna instrumentación han convertido la ciencia y la investigación en fuerzas de arrastre de los adelantos registrados en ingeniería.

Un palo de madera, una piedra y un lecho de arcilla son materiales que abundan en la naturaleza. Pero son también materiales tecnológicos, porque pueden convertirse en un garrote, un hacha o un cuenco de cerámica. Llamamos material tecnológico al destinado para determinado uso por parte del ser humano o que se elabora para que adquiera nuevas propiedades que lo transformen en un objeto útil. Un palo se convierte en un garrote simplemente cuando a alguien le parece útil y lo recoge; a una piedra se le da la forma de hacha. La arcilla, sin embargo, requiere modelarse y transformarse por el calor para que sirva de recipiente. La elección de la mejor arcilla disponible, la aplicación de la cantidad adecuada de calor durante el tiempo preciso, el apropiado enfriamiento y el tratamiento de la superficie de la vasija cocida contribuyen a la creación de un utensilio eficaz.

Los primeros artesanos desarrollaron de una manera empírica su conocimiento de los materiales –primero la cerámica, después el bronce y el hierro–, así como las técnicas para elaborarlos. Los arqueólogos desentierran sus artefactos y los científicos los analizan; gracias a lo cual, se puede deducir algo sobre las técnicas empleadas, pero no hay manera de saber el grado de conocimiento que poseían los artesanos sobre la naturaleza de los materiales que trabajaban hasta la aparición de la imprenta. Obras del siglo XVI tales como el *De la Pirotechnia*, de Vannoccio Biringuccio, y el *De Re Metallica*, de Georgius Agricola, proporcionaron los primeros atisbos sobre la tecnología de la época y los conocimientos que los artesanos tenían de los materiales.

Sabían, por ejemplo, de qué manera había que combinar carbón vegetal con un mineral para fundirlo, y así separar la ganga del metal; sabían también mezclar dos metales para producir una aleación más fácil de trabajar y más dura, después de fraguar, que cualquiera de los dos metales por separado, y cómo endurecer un metal mediante el temple o la forja. Tal dominio práctico de los materiales y de su elaboración, aunque fuera impresionante, provenía de la experiencia. Poco, si algo, habían aportado los eruditos. Los alquimistas no se hablaban con los herreros.

Esta falta de soporte teórico persistió incluso hasta después de la revolución científica de los siglos XVII y XVIII, la revolución industrial y el primer asomo de la industria a principios del XIX. Los materiales aprovechables por la técnica eran desconocidos para los investigadores y demasiado complicados para los instrumentos de que disponían. Los artesanos sabían que cada material tenía cualidades específicas y sabían también cómo trabajarlo para sacar partido de sus propiedades y fabricar productos comerciales. Carecían de la necesaria comprensión científica, sin la cual no podía pensarse en modificar el proceso de elaboración para obtener el máximo rendimiento del producto.

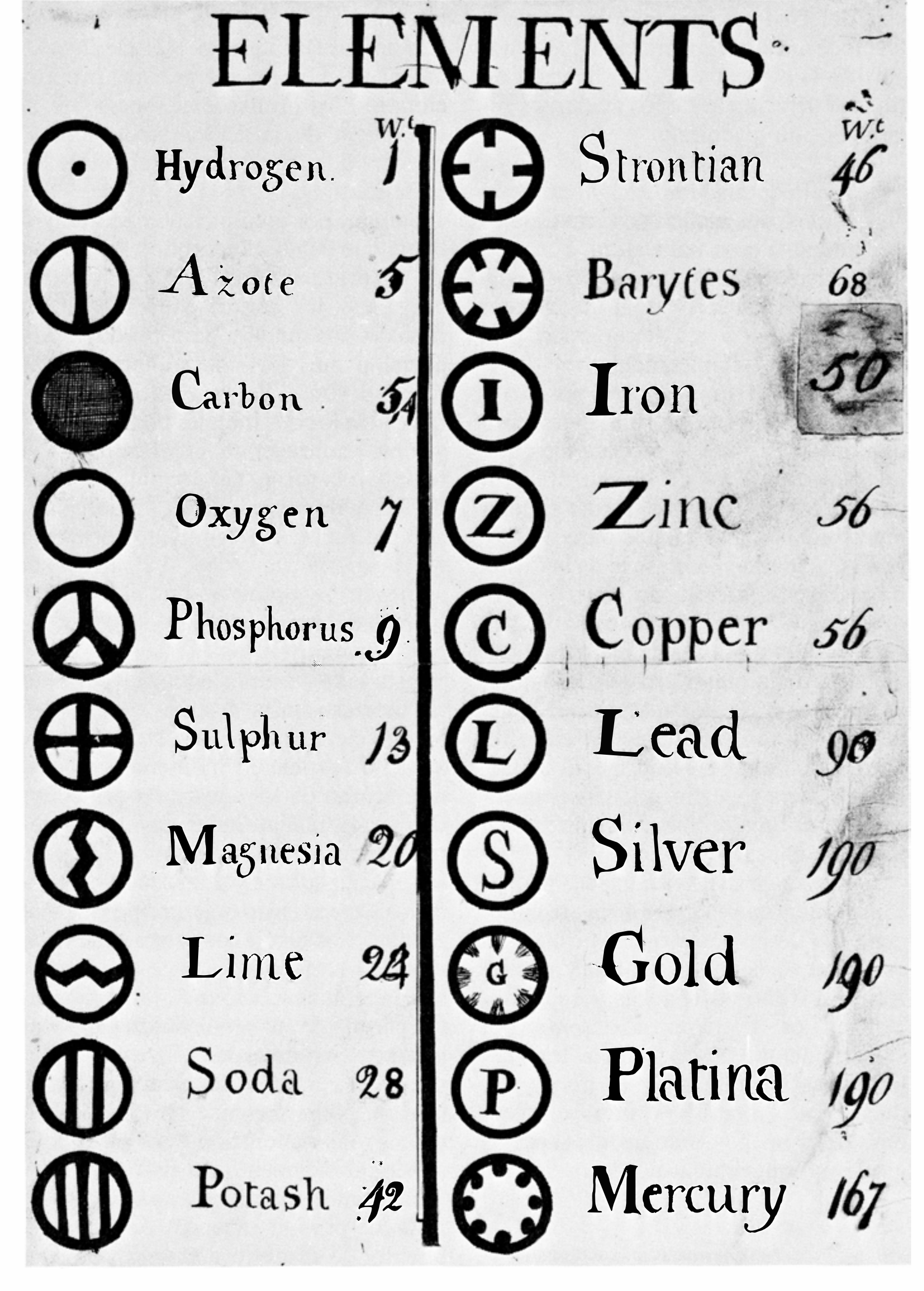
El primer cambio en esta situación, instado por el avance del conocimiento, se produjo a finales del siglo XIX. Comenzó con el progreso de la química. La teoría química demostró su eficacia para guiar una elaboración

1. MICROESTRUCTURA de una aleación de aluminio-litio, puesta de relieve en una microfotografía, tomada con luz polarizada, de un corte de la muestra. La micrografía, que aumenta la muestra 265 veces, se hizo en los laboratorios Alcoa. Las regiones de colores diferentes representan granos cristalinos de la aleación con orientaciones distintas, que es más ligera y rígida que el aluminio sin alear. El control de la microestructura ha abierto enormes posibilidades para el desarrollo de materiales con nuevas propiedades.

más rentable de los materiales, como nunca se había conocido hasta entonces. En ese contexto, el conocimiento de la oxidación se aplicó a la siderurgia: cantidades controladas de oxígeno, aplicadas a presión a un metal fundido, se combinaban con las impurezas para formar óxidos que podían extraerse del fundido, como ocurría en el método Bessener. El análisis químico acabó siendo una herramienta fundamental para la elección de la materia prima y para el control de su elaboración. Con los procedimientos de análisis se controlaba el destino de algunos elementos en particular, tales como el carbono, en el curso de la fabricación del acero.

En 1866 vio la luz un nuevo método de análisis. Henry Clifton Sorby, geólogo inglés, pionero de la microscopía, aplicó el microscopio óptico al estudio del acero. Observó que la textura de una superficie de fractura era de naturaleza cristalina y que variaba mucho según la composición del acero y el tratamiento térmico a que hubiera sido sometido. Esta primera observación de los cambios que se producían en la estructura interna de un metal, junto con los conocimientos sobre su composición proporcionados por la química analítica, supusieron un hito histórico en el camino hacia la comprensión de la naturaleza íntima de los materiales.

En el último cuarto del siglo XIX la química y la física intervenían de una manera decisiva en el control de la elaboración industrial de los materiales. En 1886 las ciencias físicas colocaron los cimientos de una prometedora industria de materiales: el químico norteamericano Charles Martin Hall desarrolló un método para producir aluminio metálico sin grandes dispendios haciendo pasar una corriente eléctrica a través de criolita fundida, un fluoruro de sodio y aluminio. Los decenios siguientes conocieron grandes adelantos en la preparación de nuevos procesos de fabricación de aceros inoxidables, aceros ricos en carbono y al silicio.

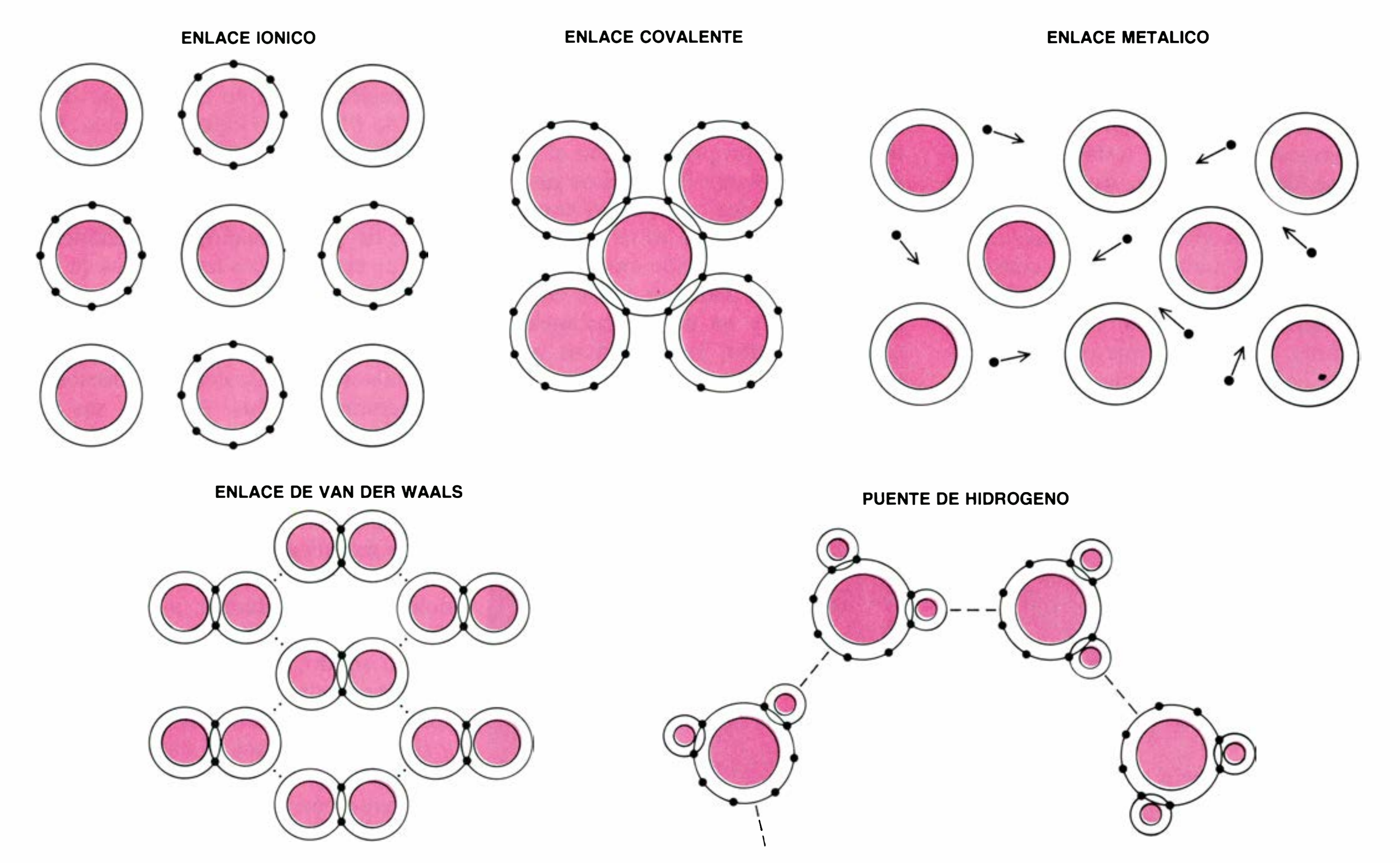


2. TEORIA ATOMICA propuesta por el químico John Dalton al comienzo del siglo XIX. En el gráfico que enseñaba durante las clases a sus alumnos, mostraba los símbolos de lo que él creía que eran los “átomos o elementos” irreducibles en ningunos otros, con pesos atómicos basados en el del hidrógeno como unidad.

Pero hubo que esperar al siglo XX, y en particular a los últimos 40 años, para que químicos y físicos adquirieran los conocimientos fundamentales sobre los que se asientan hoy los avances en el desarrollo de nuevos materiales y nuevas técnicas de elaboración. El conocimiento riguroso y profundo de los materiales, junto con las poderosas herramientas analíticas de que ahora se dispone para su estudio, han conducido a una estrecha cooperación entre científicos e ingenieros de materiales.

La contribución clave de la ciencia fue poner en relación las propiedades externas del material con su estructura interna. Se descubrió que los materiales poseían una arquitectura interna: una jerarquía de sucesivos niveles estructurales. Pronto se llegó a la conclusión de que la complejidad estructural permitía explicar con éxito el amplio abanico de propiedades que presentaban los materiales. Este reconocimiento implicaba, a su vez, poder predecir el comportamiento de un material a partir de un estudio atento de su arquitectura interna.

Tal estudio ha venido facilitado por un conjunto de nuevos instrumentos y técnicas que revelan detalles cada vez más finos. Sorby había observado, a través de su microscopio, la microestructura del acero. En su momento, la microscopía óptica fue superada, primero por la microscopía electrónica de transmisión, que puede resolver detalles de la subestructura, y, después, por la microscopía electrónica de barrido, que proporciona una importante información tridimensional de la superficie. Merced a la difracción de rayos X se puede cartografiar la distribución espacial de átomos o moléculas en un cristal. Se puede llegar incluso a una definición de los materiales a escalas atómicas mediante diversas espectroscopías de excitación y con el bombar-



3. ENLACES QUIMICOS, determinados por la estructura electrónica de un material; están directamente relacionados con las propiedades del material. Los cinco tipos de enlaces se muestran aquí de una manera esquemática. En la mayoría de los materiales se da alguna combinación de enlaces. El enlace iónico se establece entre iones, átomos cargados positiva o negativamente; los iones con cargas opuestas sufren una atracción mutua. En el enlace covalente, cada pareja de átomos comparte sus electrones externos para llenar la última capa electrónica. En un metal, los electrones de las capas externas son compartidos entre todos los átomos, moviéndose a través de la red; constituyen los electrones de conducción. El enlace de Van der Waals es una atracción débil entre moléculas o átomos neutros y cercanos. El débil enlace por puentes de hidrógeno está mediado por un átomo de hidrógeno que es compartido por dos moléculas.

deo de éstos por partículas de alta energía puede sondearse el núcleo atómico.

La recién descubierta estructura interna de los materiales proporciona un marco para introducirnos en el conocimiento del estado sólido en general y de los distintos materiales en particular. La combinación de la teoría y el análisis con el trabajo empírico no sólo ha conducido a una elaboración más rentable de los materiales naturales, sino también a una extraordinaria diversidad de nuevos materiales artificiales: fibras de polímeros sintéticos y plásticos, aleaciones metálicas de alta resistencia térmica y mecánica, fibras de vidrio que sirven de guías de onda ópticas, imanes fabricados con elementos de las tierras raras, cerámicas tenaces, materiales híbridos y los semiconductores que dieron origen a la microelectrónica.

Este conjunto de avances lo ha logrado una nueva disciplina integrada: la ciencia e ingeniería de materiales. Sus cultivadores se consideran científicos e ingenieros y se ocupan de las relaciones entre la estructura, propiedades y comportamiento, así como de la manera en que esas interacciones mutuas se ven afectadas por el proceso de elaboración. Este punto merece una pequeña explicación.

Los materiales tienen estructura, así se llama la disposición o configuración de sus componentes internos. Para empezar, presentan estructura subatómica, de la que se estudia la localización y densidad electrónica y sus interacciones mutuas. Subiendo un peldaño nos encontramos con la organización de átomos o moléculas: llegamos a la disposición precisa de los átomos en la red de un material cristalino. El siguiente dominio estructural corresponde a las grandes agrupaciones de átomos con algunas características identificables; pensemos en los granos de un metal o de una cerámica. Estos grupos se aglomeran dando lugar a la microestructura y ésta, a su vez, a los elementos estructurales macroscópicos distinguibles a simple vista.

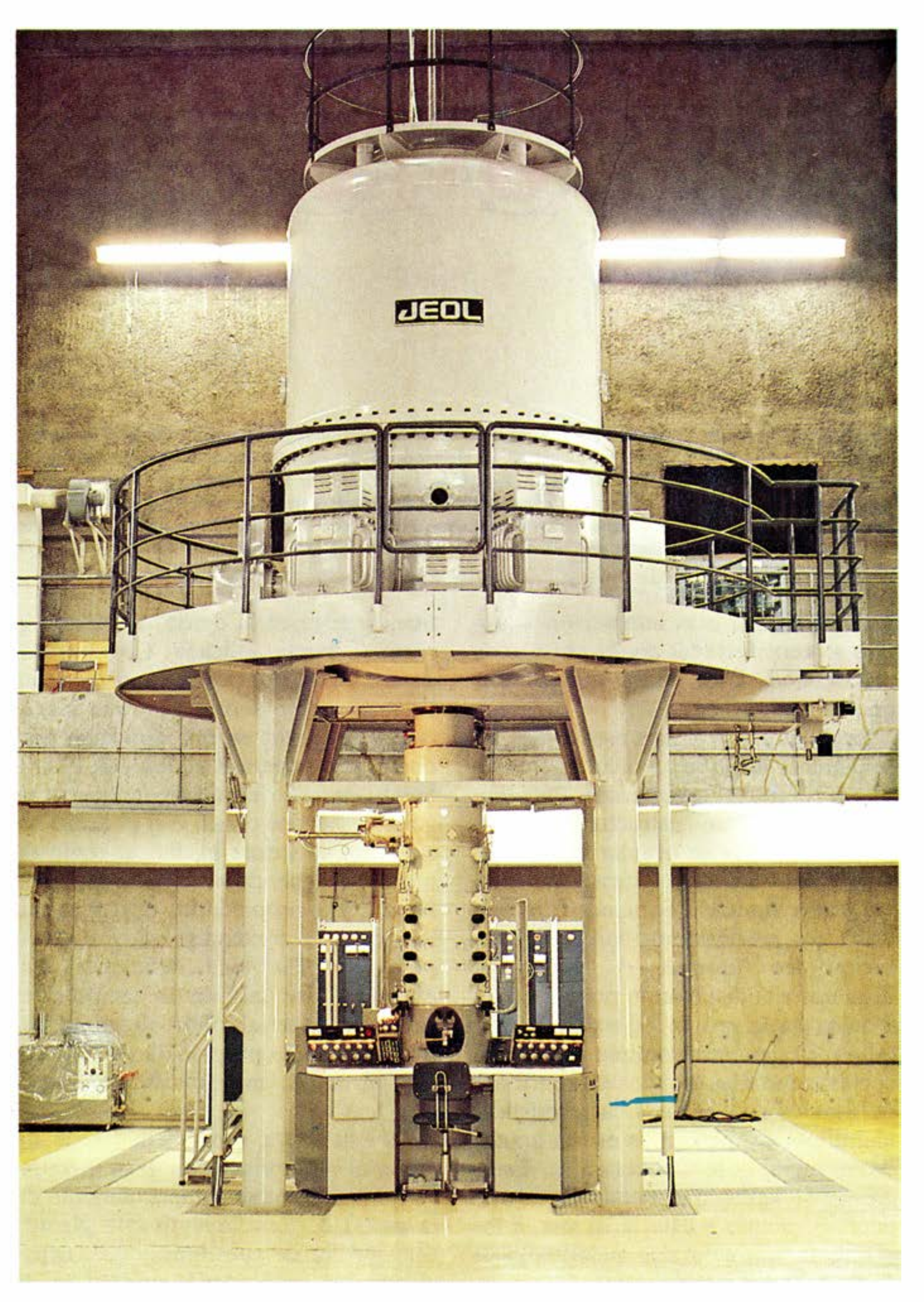
Además de una estructura, el material tiene propiedades, entendiendo por tales las respuestas características ante estímulos externos. Las propiedades mecánicas de los materiales, como la resistencia y el módulo elástico, relacionan la deformación con la carga o fuerza aplicada. Con eso podemos saber, por poner un caso, si una barra de acero sometida a una fuerza cada vez mayor en una dirección particular se romperá o se doblará, el momento en que eventualmente ocurra alguna de las dos cosas, o si el acero recuperará su forma inicial, al estilo de un muelle, cuando se deje de aplicar la fuerza. Las propiedades eléctricas, tales como la conductividad y su recíproca, la resistividad, definen las respuestas al estímulo de un campo eléctrico. Un material sólido ofrece un amplio abanico de propiedades interesantes, térmicas, magnéticas, ópticas y químicas.

La estructura y propiedades de un material determinan, en gran medida, su rendimiento, su comportamiento en la realidad. Rendimiento que plantea otra gavilla de cuestiones. Así, conociendo las propiedades mecánicas de un material, podremos describir la respuesta del mismo ante una fuerza "ideal" bien definida. Pero en la práctica cotidiana la fuerza está lejos de hallarse bien acotada. Y sería mejor compararla a un complejo sistema de fuer-

zas diversas y variables que pueden tener efectos aditivos, contrarios entre sí o sinergéticos.

La estructura, las propiedades y el comportamiento se traban en el proceso de elaboración, que puede definirse como el control o modificación, en cualquier nivel, de la estructura interna de un material a fin de conseguir las propiedades y comportamientos deseados. La elaboración es, en otras palabras, la causa de que ocurra todo lo que hemos venido diciendo.

Los teóricos de materiales han venido insistiendo en la estructura, las propiedades y la relación entre aquélla y éstas. Los ingenieros, por su lado, se han concentrado en la relación de la estructura y las propiedades con el comportamiento y con las técnicas de elaboración que mejoran dicho comportamiento. Ahora que ya se conoce mejor cómo la elaboración modifica la estructura de un material, y con ello sus propiedades y en última instancia su comportamiento, los científicos se interesan cada vez más por el procesado y han empezado a tomar parte en él. Sus hallazgos han posibilitado depurar los procesos en áreas que van desde la fabricación del acero hasta la producción de fibras de vidrio muy puro. Un ejemplo impresionante de la aportación científica es el desarrollo de métodos para producir monocristales de silicio de gran tamaño, semiconductor del que están hechas las pastillas de los circuitos integrados.



4. MICROSCOPIO ELECTRONICO DE ALTA POTENCIA del Instituto de Ciencia de Materiales de la Universidad de Amberes. Está capacitado para resolver la estructura atómica de una muestra de material. Los electrones, acelerados hasta una energía de 1/25 millones de volt mediante un multiplicador de voltaje de Cockcroft-Walton en el depósito que se ve arriba, se enfocan en la muestra mediante las lentes electromagnéticas que hay en la columna inferior. La imagen se examina en una pantalla fluorescente o se registra en una placa fotográfica. La alta aceleración de los electrones, que les permite penetrar en una muestra gruesa, dota, a este prototipo de microscopio, de la eficacia necesaria para el estudio de los materiales.

Los científicos prefieren trabajar con materiales "ideales" y procesos o estructuras sencillos. Aun así, sus resultados facilitan la comprensión, al menos cualitativa, de materiales más complejos. Además, un modelo teórico, basado en un material ideal, puede modificarse para que se ajuste a las características de un material tecnológico real. Citemos, a este propósito, los primeros trabajos de física del estado sólido; abordaban los metales sólidos cristalinos: materiales compuestos por estructuras infinitas, ordenadas y rígidas, de átomos. Estas estructuras ordenadas proporcionaban un marco coherente con las teorías y podían explicar algunas propiedades de los metales. Se observó, sin embargo, que la resistencia mecánica real de los materiales era varios órdenes de magnitud inferior a la resistencia teórica calculada para sólidos cristalinos ideales. Estaba claro que algunas propiedades –resistencia mecánica y otras– eran sensibles a las desviaciones de la estructura ideal del cristal.

Este reconocimiento de los hechos llevó a los físicos hasta la noción de defecto. Descubrieron que, en condiciones normales, algunas posiciones atómicas de una estructura quedaban desocupadas, que los átomos ocupaban lo que debieran ser "huecos" en la hilera, que un tipo atómico podía substituirse por otro y que algunos átomos vibraban, en vez de permanecer estáticos. Más aún, cabía que la estructura no se ajustara a la periodicidad exacta de la red cristalina: dislocaciones, defectos de apilamiento, fronteras de grano y fenómenos por el estilo. En su día se propusieron teorías para explicar la existencia de los defectos y su papel en la alteración de las propiedades. Gracias a estas teorías se ha llegado luego a la posibilidad de producir intencionadamente algunos defectos, obteniendo así las estructuras y propiedades deseadas. En el caso de materiales no cristalinos resulta mucho más difícil predecir el efecto de la elaboración. En los vidrios y en la mayoría de los polímeros, pequeñas variaciones en la fabricación pueden provocar un efecto importante

e inesperado sobre las propiedades y el comportamiento.

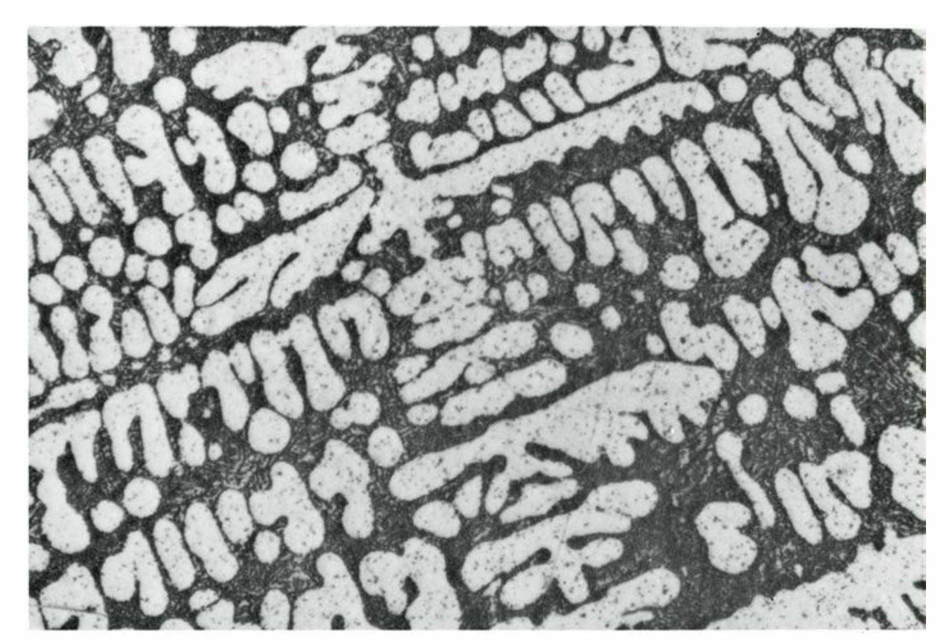
En la misma medida en que la cristalografía proporciona un marco para desentrañar la estructura cristalina de los materiales reales, la ciencia y las leyes de la termodinámica han ido poniendo de manifiesto lo que se denomina el estado de equilibrio de los materiales. La termodinámica determina el efecto del entorno, en particular de la presión y de la temperatura, sobre el estado de equilibrio (el estado de reposo de un material o de un sistema cualquiera). Las leyes de la termodinámica establecen la energía de un sistema y las variables ambientales para describir el estado de equilibrio del sistema o las transiciones entre estados. El de equilibrio se define como el estado de mínima energía de un material para una temperatura, presión y composición determinadas. Por citar un ejemplo, pensemos en un cuerpo en el que se ha producido un gradiente de temperatura: el cuerpo tiende a adquirir una temperatura uniforme y se esforzará por conseguirlo.

Un material en cuya composición entren a formar parte dos o más substancias, puede presentar dos o más fases: homogéneas, distintas físicamente y mecánicamente separables, algo parecido a lo que pasa con el agua y el aceite (en este sentido la mayoría de los mejores materiales estructurales son compuestos). En condiciones ideales, las fases están en equilibrio. Volvemos a encontrarnos el mismo problema en la práctica: que las condiciones no son ideales. Cuando sometemos un material, arcilla o acero, a un proceso de calentamiento, transformación o enfriamiento, puede pasar por varios estados fuera del equilibrio. La mayoría de los materiales de interés tecnológico han sufrido una profunda manipulación, atravesando estados fuera del equilibrio; incluso hay algunos que entran en servicio en estado metaestable.

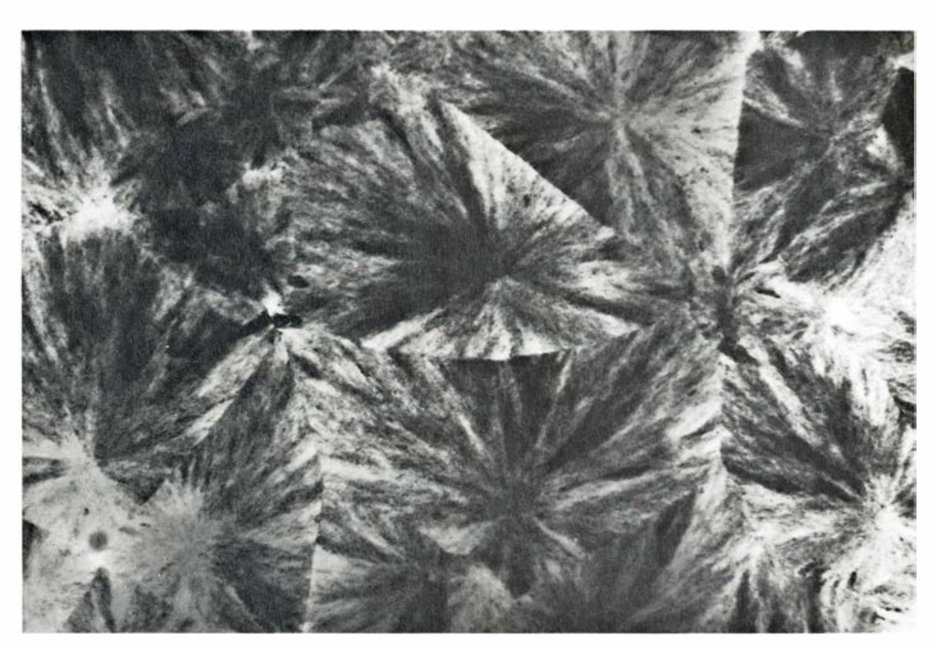
El templado del acero, por ejemplo, retrasa la reacción de equilibrio que compromete a sus átomos de hierro y carbono; deja, así, al material en una configuración en la que realmente no "quiere" estar. Aunque el templado diferencial se viene practicando desde hace tiempo en la fabricación de aceros de alta calidad, la pobreza de conocimientos explica que la alteración de la composición química fuera durante años la única manera de controlar eficazmente la elaboración de un material determinado y de intentar sintetizar otros nuevos. Con el tiempo, la mejor comprensión de los estados de equilibrio ideales y las desviaciones particulares del estado ideal, que provocan estados metaestables, hizo posible modificar las configuraciones estructurales a través del control de la elaboración.

Distintos tratamientos térmicos especializados para el acero en estado sólido dan lugar a múltiples configuraciones estructurales. Podemos pensar en fases metaestables tales como la martensita, notable por su dureza y resistencia mecánica. La verdad es que gracias a las amplias posibilidades de modificación que el acero sufre en sus propiedades con el tratamiento térmico, puede vanagloriarse de su versatilidad de aplicaciones tecnológicas. La cerámica, el vidrio y los polímeros, entre otras aleaciones metálicas, también pueden modificarse estructuralmente mediante diferentes elaboraciones que les confieren propiedades específicas.

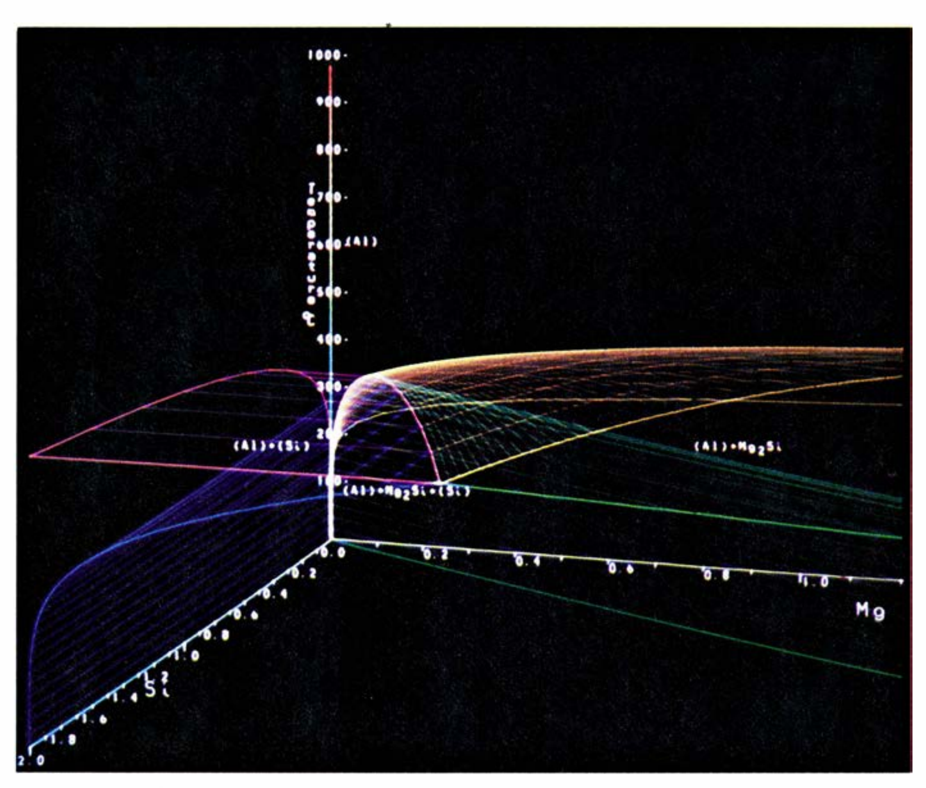
El procesado de materiales lejos del equilibrio es el principal responsable de la aparición de una extensa gama de es-



5. ALEACION CONVENCIONAL de aluminio y silicio fundidos, aumentada 385 veces, en esta microfotografía tomada por Thomas H. B. Sanders Jr., de la Universidad de Purdue. Las dos "fases" aparecen con nitidez. La fase más clara (que es la que tiene un contenido en silicio menor que la oscura) presenta la típica morfología dendrítica (ramificada) de una aleación enfriada a una velocidad relativamente baja.



6. ALEACION RAPIDAMENTE ENFRIADA de aluminio-cobalto, aumentada 125.000 diámetros en esta microfotografía electrónica realizada por Thomas H. B. Sanders Jr. El material, solidificado en forma de virutas, se enfrió a una velocidad de un millón de grados Celsius por segundo. No hubo tiempo suficiente para que se formaran fases separadas y el material resultante, fuera del equilibrio, presenta una sola fase microcristalina. Los elementos con aspecto de pluma son microcristales con orientaciones diferentes.



7. SUPERFICIES COLOREADAS en este diagrama de fases elaborado en los laboratorios Alcoa. Nos ofrece las fases que presentaría una aleación de aluminio-magnesio-silicio según su composición después de un tratamiento térmico a una determinada temperatura. El eje vertical indica la temperatura; los dos ejes horizontales, el contenido de silicio y magnesio. Las fases son la matriz de aluminio (Al), un precipitado de magnesio y silicio (Mg_2Si) y una solución sólida de silicio (Si). En el espacio tridimensional por encima de la superficie naranja sólo aparece la fase de aluminio (hasta el punto de fusión del aluminio, a 660 grados Celsius). Tanto la fase de aluminio como la de magnesio-silicio están presentes entre las superficies naranja y verde, las tres fases entre las superficies verde y azul y sólo las de aluminio y silicio entre la azul y la púrpura. El programa que genera el diagrama fue desarrollado por Dhruba J. Chakrabarti y Sharon L. Ramsey.

tructuras auténticamente nuevas –de nuevas configuraciones atómicas, en realidad– hechas a medida para que presentasen nuevas propiedades y tipos de comportamiento distintos. Una de las maneras conceptualmente más sencillas para que un material salga del equilibrio consiste en enfriarlo muy rápidamente.

En 1960, Pol E. Duwez y sus colaboradores, del Instituto de Tecnología de California, inventaron el enfriamiento "por impacto" ("splat cooling"). Se trata de lanzar una pequeña cantidad de sal fundida, a gran celeridad, sobre una superficie muy fría. Mostraron así que los metales podían enfriarse partiendo del estado líquido a velocidades del orden de 10.000 grados Celsius por segundo (en lugar de las velocidades típicas de cientos o como mucho mil grados por segundo) y que tal templado brusco daría lugar a una serie, enteramente nueva, de características.

Hasta el momento se han desarrollado varias técnicas para producir un enfriamiento muy rápido. En todas ellas, la transferencia de calor se consigue lanzando, aplastando o pulverizando un metal fundido para que se produzca un contacto súbito con un medio extremadamente frío. Ello comporta restringir al menos una dimensión del sólido rápidamente enfriado, que adquiere la forma de polvo, cintas o virutas. Hay aplicaciones concretas para las cuales estas formas son apropiadas, como en el caso de cabezas grabadoras hechas de cintas o láminas rápidamente enfriadas. En la mayoría de las ocasiones, sin embargo, las partículas o las cintas deben configurarse en presentaciones más apropiadas.

Uno de los resultados más impresionantes del enfriamiento rápido es su efecto en la microestructura. En una micrografía de una aleación enfriada a velocidad normal se pueden ver cristales con formas ramificadas denominadas dendritas. Tales formaciones surgen provocadas por la solidificación de una fase antes que la otra en un material multicomponente. A medida que la fase sólida se expande, las condiciones locales de transferencia de masa y calor en la interfase en crecimiento tienden a generar dendritas, cuyos espacios intermedios se rellenan más tarde con la fase o fases que solidifican más despacio. El intervalo entre dendritas decrece a medida que aumenta la velocidad de enfriamiento. (La correlación entre el espaciado de la dendrita y la velocidad de enfriamiento puede proporcionar, a la larga, una medida indirecta de la velocidad de enfriamiento de una muestra, valor que puede ser difícil de establecer con precisión.)

Las microestructuras más finas obtenidas mediante incrementos moderados en la velocidad de enfriamiento presentan nuevas propiedades. Estas velocidades pueden incrementarse ya hasta un millón e incluso mil millones de grados por segundo. Bajo tales condiciones, desaparece la formación de fases separadas y surgen pequeños microcristales monofásicos o incluso una estructura amorfa, similar a la del vidrio. Cuando se combina el control de la composición química con los posibles controles estructurales disponibles ahora gracias a las técnicas de solidificación rápida, la capacidad para desarrollar nuevas propiedades resulta casi ilimitada. Manipulando estas variables, se puede llegar no sólo a mejorar la resistencia mecánica del material, su dureza, rigidez y resistencia frente al desgaste y la corrosión, sino también especificar su comportamiento en un campo magnético.

Una línea de investigación conducente a un tipo diferente de modificaciones estructurales fue iniciada en 1970 por Leo Esaki y Raphael Tsu, del Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM. Avanzaron la posibilidad de sintetizar una estructura "modulada". Se conocía desde hacía mucho tiempo que los minerales y aleaciones presentaban lo que se denominaban modulaciones químicas de larga longitud de onda: defectos o variaciones periódicas que, en el caso de un material cristalino, se superponen a la red básica del cristal. Esaki y Tsu sugirieron que, si se imponía una periodicidad artificial a un cristal semiconductor –una periodicidad uno o dos órdenes de magnitud mayor que el espaciado natural de la red–, el material resultante presentaría propiedades ópticas y eléctricas nuevas que podrían resultar de gran valor.

En los últimos 15 años se han concentrado muchos esfuerzos en la fabricación de tales estructuras moduladas y la investigación de sus propiedades. La mayoría del trabajo se ha llevado a cabo con "superredes" cristalinas semiconductoras, constituidas por láminas delgadas de dos semiconductores diferentes. Una de las técnicas más prometedoras ha sido la epitaxia de ha-

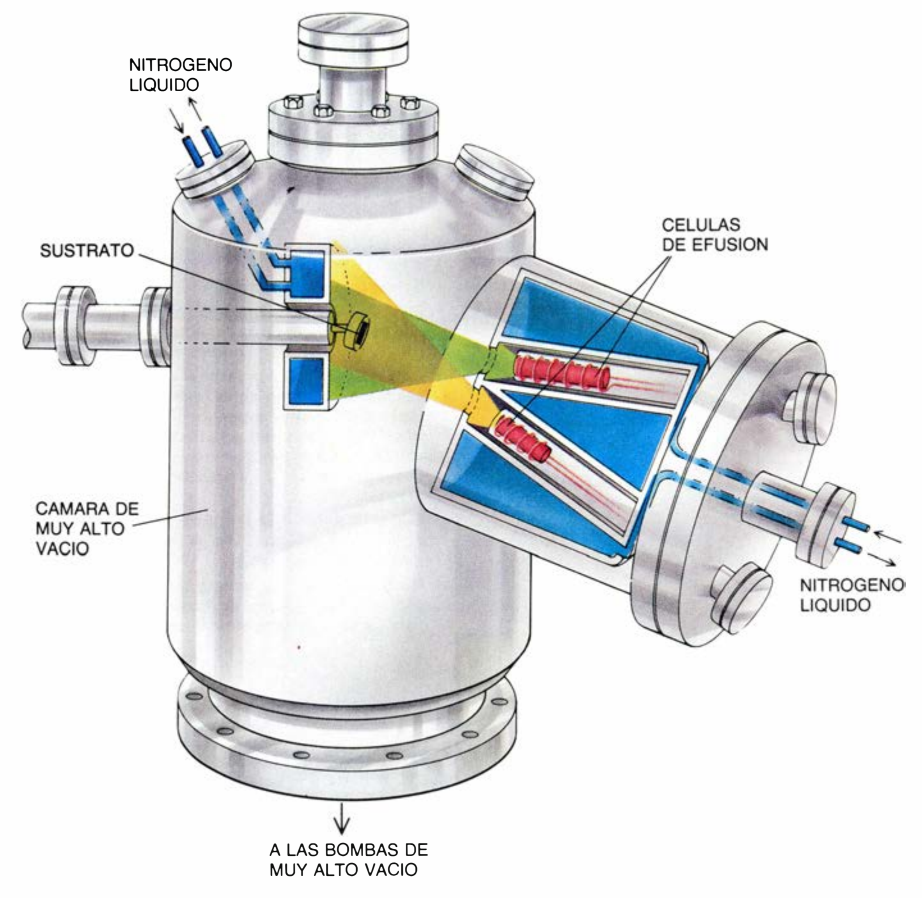
ces moleculares (conocida por las siglas inglesas MBE), mediante la cual láminas extremadamente delgadas de diferentes semiconductores se van depositando como si se tratara de pintar con pistola. En este caso, se dirigen chorros de átomos o de moléculas desde células de efusión calientes, o crisoles, hacia un sustrato colocado sobre un portamuestras con temperatura controlada y situado dentro de una cámara de altísimo vacío. El resultado es una epitaxia: un crecimiento orientado por capas en el que cada capa sucesiva tiende (sin alcanzarlo) a adoptar la orientación de la red de la capa subyacente. La modulación es, en otras palabras, química y estructural.

Las características de la MBE satisfacen de manera exclusiva las rígidas exigencias de una superred semiconductora. La pequeña velocidad de crecimiento posibilita el control del espesor de cada lámina. La baja temperatura a la que tiene lugar la deposición minimiza la interdifusión de los dos materiales, y así las interfases aparecen limpias y claras. El hecho de que el crecimiento tenga lugar en dos dimensiones, o plano a plano, facilita la obtención de superficies lisas en un nivel casi atómico.

La MBE no es todavía una tecnología para la fabricación en cadena de circuitos integrados, pero puede llegar a serlo pronto. Mientras se trabaja en esa dirección, se está investigando también en otras cuestiones interesantes sobre el crecimiento y la estructura electrónica.

En una micrografía electrónica de alta resolución de una interfase pueden verse los átomos individuales de los dos semiconductores diferentes. (Lo que se observa realmente son las imágenes formadas por la difracción de electrones de cada nube electrónica de los átomos.) Puede verse que la deformación inevitable en la interfase entre estas dos redes desacopladas se relaja mediante una hilera regular de dislocaciones. ¿Cómo afectan exactamente esas interfases entre capas adyacentes al crecimiento de tales estructuras? Una vez más, el papel básico de la periodicidad en la determinación de las propiedades electrónicas de sólidos se somete a prueba en el mundo artificial de las superredes. Debiera ser posible sintetizar sólidos donde los electrones mostraran nuevos valores de energías propias y se movieran de un estado de energía a otro, o de un lugar del espacio a otro. Habrá que conocer no sólo las propiedades macroscópicas de las láminas alternas, sino también los efectos electrónicos de las interfases, si queremos predecir tales propiedades con alguna seguridad.

La posibilidad de sintetizar estructuras moduladas abre un nuevo campo de estructuras diseñadas que gocen de las propiedades buscadas. Lo que no sólo será cierto para superredes semiconductoras, sino también para muchos otros materiales con otras aplicaciones posibles. Así, la MBE podría ser, a la larga, capaz de producir recubrimientos ópticos que dieran respuestas especulares específicas en determinadas zonas del espectro, los llamados dispositivos de óptica no lineal (que podrían convertirse en elementos de los ordenadores ópticos), capas superficiales para la prevención de la corrosión y materiales que respondan de la manera buscada al campo magnético.

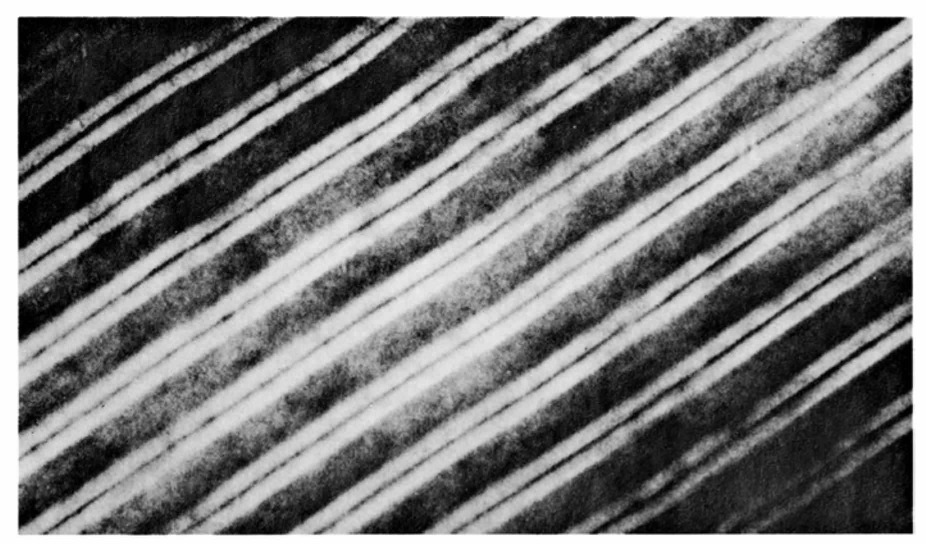


8. EPITAXIA DE CHORROS MOLECULARES (MBE): sintetiza materiales fuera del equilibrio tales como las superredes, en las cuales delgadas láminas de materiales distintos se depositan alternativamente sobre un sustrato que tiene una periodicidad atómica similar. Los materiales se vaporizan en celdas de efusión parecidas a un horno; los chorros se dirigen contra el sustrato que está en una cámara de altísimo vacío. Las superficies se mantienen frías mediante nitrógeno líquido, que atrapan gases residuales y mantienen el vacío. La figura simplifica el proceso real: los sistemas de MBE incluyen equipos de control e instrumentación.

Como ha sucedido frecuentemente, el progreso registrado por la ciencia de materiales en la última década ha venido auspiciado por notables mejoras en las técnicas de caracterización de materiales. Los nuevos microscopios han rastreado las estructuras hasta sus detalles más finos. Al microscopio electrónico de transmisión se deben algunos de los resultados más sorprendentes. El microscopio electrónico de alto potencial resuelve estructuras de hasta una décima de nanómetro de diámetro (o la diezmillonésima del milímetro), que es aproximadamente el tamaño de los átomos.

El microscopio electrónico de barrido y el nuevo microscopio electrónico analítico proporcionan información tridimensional. El último es un sistema integrado que combina las funciones de un microscopio electrónico convencional de transmisión, un microscopio electrónico de barrido y dos tipos de espectroscopía analítica. Se han proyectado otros microscopios nuevos y exóticos que aportarán información acerca de la superficie de los materiales difícil de obtener. Las diversas técnicas de formación de imagen se están completando con mapas de difracción de electrones, que hacen posible la recogida de datos de la periodicidad de la red y de otros aspectos cristalográficos.

Uno de los desarrollos más signifi-



9. SUPERRED DE TRES CAPAS obtenida por epitaxia de chorros moleculares aumentada 800.000 veces en esta microfotografía electrónica a campo oscuro a partir de un corte de la muestra. La obtuvo Nobuo Otsuka, de Purdue. Las bandas claras son de zinc-selenio; las más oscuras y anchas, de zinc-manganeso-selenio. Cada banda oscura y estrecha corresponde al espesor de una celda de manganeso-selenio.

cativos en la tecnología analítica ha tenido lugar en los últimos 15 años con la aplicación a la investigación de materiales de la radiación de sincrotrón. La radiación se emite cuando las partículas cargadas de un acelerador de tipo sincrotrón salen desviadas por un campo magnético. Un sincrotrón es, en consecuencia, no sólo una fuente de partículas elementales aceleradas, sino también de fotones, las partículas de la radiación electromagnética. Merced a este proceso se pueden sustituir las fuentes convencionales de radiación en espectroscopía, que es una poderosa técnica analítica para los científicos de materiales.

La espectroscopía examina el espectro característico resultante de la interacción de fotones de una energía particular con los electrones del material. Se pueden llevar a cabo dos tipos básicos de experimentos consistentes en estudiar la dispersión o bien la absorción de fotones. Los fotones pueden ser de la zona infrarroja, visible, ultravioleta o de los rayos X, en función de la parte de la estructura electrónica que se esté investigando. La radiación de sincrotrón es más intensa y su colimación más perfecta que la proveniente de fuentes convencionales; ello aumenta la sensibilidad de las mediciones. Aún más, la radiación de sincrotrón abarca un amplio rango de energías, del infrarrojo hasta más allá de la región de los rayos X, lo que posibilita que el experimentador seleccione la energía óptima en cada medición.

La difracción de los rayos X de la radiación de sincrotrón tiene otra aplicación, bastante diferente de la espectroscopía: los mapas de difracción de alta resolución ponen de manifiesto detalles de las estructuras materiales que no podían estudiarse antes. Esos aspectos, tanto de la estructura del material como de su superficie, aportan información relativa a la resistencia mecánica del material, sus propiedades electrónicas, la resistencia a la corrosión y el comportamiento catalizador.

Hoy día existen siete instalaciones de radiación de sincrotrón en los EE.UU., dos de las cuales entraron en funcionamiento en los últimos dos años: las instalaciones de la Universidad de Wisconsin, que proporcionan radiación en la zona ultravioleta, y las del Laboratorio Nacional de Brookhaven, que proporcionan radiación del ultravioleta lejano y rayos X. En reconocimiento de las grandes posibilidades de la radiación de sincrotrón, un informe reciente de la Academia Nacional de Ciencias sobre instalaciones necesarias para investigación de materiales concede prioridad especial a una nueva fuente sincrotrón de rayos X de alta energía.

Las potentes instalaciones experimentales constituyen, por supuesto, sólo un elemento en el avance de la ciencia de materiales. Como ponen de relieve los artículos anteriores a éste, el mayor estímulo para mejorar los materiales existentes y sintetizar otros nuevos ha venido de la apremiante necesidad del mercado de nuevas prestaciones de los materiales. La mejora del comportamiento del material deriva del desarrollo de los métodos de procesado con los que se consiguen estructuras nuevas que presentan propiedades desconocidas. Las teorías actuales hacen posible la predicción de esas estructuras y propiedades, y la instrumentación valora el grado en que se cumplen las predicciones. Los artículos que siguen a éste presentan un panorama de materiales avanzados (conseguidos gracias a las nuevas teorías e instrumentación y a las innovadoras tecnologías de elaboración) con los que ni siquiera se soñaba hace escasas décadas.

10. ATOMOS INDIVIDUALES (en realidad, sus imágenes de difracción). Se resuelven en una microfotografía electrónica de la interfase entre capas de arseniuro de galio y teluro de cadmio en una superred. El corte se aumentó 5,1 millones de diámetros en la micrografía, obtenida por Otsuka en el microscopio de un millón de volt del Instituto de Tecnología de Tokio. En la parte inferior aparecen átomos de galio y arsénico, y en la superior átomos de cadmio y de teluro. Las dislocaciones acoplan las deformaciones en la interfase.



Materiales electrónicos y magnéticos

Dentro de poco, las pastillas semiconductoras empleadas en las operaciones lógicas de alta velocidad alojarán más de 100.000 transistores y las que forman la memoria de un ordenador almacenarán 16 millones de bits de información

Praveen Chaudhari

Las ventas de la industria de la electrónica en el mundo entero alcanzarán alrededor del billón de dólares hacia finales de siglo. Las estimaciones colocan las ventas actuales por encima de los doscientos mil millones de dólares, cifra equivalente al producto nacional bruto de la India y superior al PNB de cualquier otro país del mundo, exceptuando los doce más importantes.

¿Cómo puede sostenerse el crecimiento espectacular de la industria de la electrónica? La respuesta en último término reside en su habilidad para continuar haciendo que sus productos sean indispensables a la sociedad. Aunque esta tarea requiere que el progreso se mantenga simultáneamente en varios frentes, entre ellos la fabricación y la prospección de mercados, los avances de la ciencia de materiales son, sin duda alguna, cruciales y fundamentales. En este artículo trataré sobre las tecnologías de materiales esenciales para el funcionamiento de los dispositivos semiconductores. Asimismo, se discutirán brevemente los materiales magnéticos y su empleo en el almacenamiento de información. Debo insistir, sin embargo, en que los materiales de los que aquí se habla no son los únicos en los que hay que progresar para impulsar el crecimiento de la industria de la electrónica; otros materiales también han desempeñado un papel esencial, y continuarán haciéndolo.

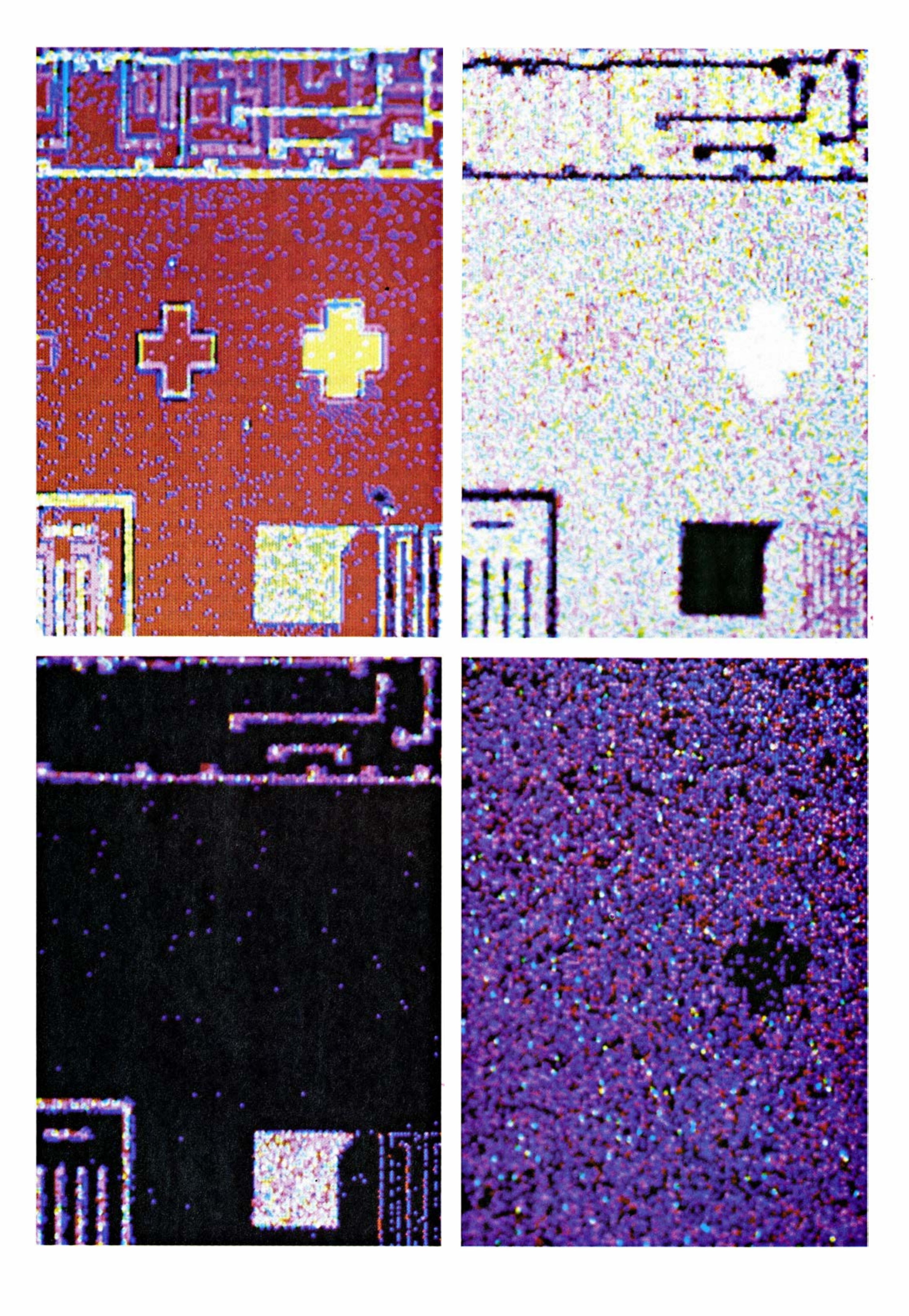
El transistor es, quizás, el dispositivo más familiar fabricado con materiales semiconductores. Desde el momento de su invención, en 1948, los investigadores han buscado la miniaturización del más fundamental de los componentes electrónicos, por un doble motivo. Al disminuir el tamaño de los transistores, los sistemas electrónicos pueden hacerse más pequeños, aumentando la sofisticación de los equipos. Esto reviste particular importancia para satélites y misiles, sistemas en que los requisitos de tamaño, peso y consumo están muy restringidos. Además, los transistores pequeños suelen ser más rápidos y baratos que los grandes: una consecuencia natural del aumento del nivel de integración y un hecho del mayor interés para la industria de los ordenadores.

El ritmo de miniaturización de los transistores ha sido muy notable. La anchura de línea, dimensión mínima característica de un circuito, se ha reducido drásticamente a lo largo del último cuarto de siglo. En 1960, una anchura de línea usual era de 30 micrometros, 30 millonésimas de metro. Hoy en día las anchuras de línea son, normalmente, del orden del micrometro, alrededor de 75 veces menores que el espesor de un cabello humano. Muy recientemente se han logrado anchuras de línea de medio micrometro, lo que representa un importante paso en el desarrollo de pastillas ("chips") semiconductoras con más de 100.000 transistores, utilizados para llevar a cabo operaciones lógicas de alta velocidad, y de pastillas capaces de almacenar hasta 16 millones de bits de información. (Un bit, o dígito binario, es la unidad fundamental de información en un ordenador, y es equivalente al resultado de elegir entre dos opciones, como "sí" o "no", o como "encendido" o "apagado").

Las extrapolaciones basadas en la tendencia histórica indican que, a mediados de la próxima década, se alcanzarán anchuras de línea de 0,1 micrometros, al menos en los dominios de la investigación y desarrollo. Algunos autores creen que esta anchura de línea representa un límite serio en el diseño de los circuitos electrónicos, ya que los inferiores a los 0,1 micrometros pueden necesitar modos de funcionamiento diferentes de los actuales. De ahí que, al acercarse el final del siglo, el desarrollo de los transistores se amplíe hacia otras áreas, además de la miniaturización. Los investigadores están aprovechando efectos peculiares para aumentar la velocidad de la actual generación de transistores, experimentando con combinaciones nuevas de materiales y nuevos diseños de transistores. Se comienza, incluso, a soñar con "biopastillas" ("biochips").

Las dos clases de transistores habituales en la industria actual de la electrónica son el transistor bipolar y el transistor de efecto campo, o FET. Ambos son parte esencial en el funcionamiento de los ordenadores. Los dispositivos bipolares son los integrantes básicos de la unidad central de procesos de un ordenador, que es la parte que opera con los datos. Por otro lado, los FET son generalmente los componentes básicos de la memoria de un ordenador y se están utilizando cada vez más para llevar a cabo operaciones lógicas en ordenadores de pequeño y mediano tamaño. La distinción de aplicaciones es

1. CABEZA GRABADORA DE PELICULA DELGADA; representa un importante avance en la tecnología de almacenamiento de la información. El dispositivo se utiliza para guardar y recuperar datos en el disco magnético de la memoria permanente de un ordenador [*véase la figura 7*]. La cabeza, que viene a medir lo que el punto final de esta frase, se fabrica por evaporación de un conductor eléctrico (espiral) sobre un sustrato cerámico. La estructura curvada de la parte superior transporta la corriente hacia la espiral, y desde ésta. La cabeza detecta campos magnéticos más débiles de lo que puede hacerlo una cabeza con arrollamiento de hilo. En consecuencia, logra una mayor densidad de datos en los discos de almacenamiento magnético.



consecuencia de que los transistores bipolares son más rápidos que los FET en la conmutación de operaciones.

A pesar de las diferencias entre ambos dispositivos, los transistores bipolares y los FET comparten principios similares de funcionamiento [véase "Elementos del circuito microelectrónico", por James D. Meindl; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1977]. En efecto, un transistor es un interruptor: aplicando carga eléctrica a una región específica del transistor, el dispositivo puede "encenderse" o "apagarse". Cuando un transistor está "encendido", fluye corriente eléctrica de una región del dispositivo a otra; cuando el transistor se "apaga", el flujo de corriente cesa. En el caso de un transistor bipolar, puede controlarse el flujo de corriente entre dos regiones denominadas emisor y colector al aplicar una carga eléctrica a una región llamada base. Los elementos correspondientes de un FET se conocen como puerta, fuente y sumidero [*véanse las figuras 4 y 5*].

Actualmente, tanto los transistores bipolares como los FET están compuestos de la misma clase de material semiconductor: silicio. En un cristal de silicio puro, hay muy pocos electrones disponibles para moverse, pues se necesitan para mantener unido el cristal. Un átomo de silicio tiene cuatro electrones exteriores, o de valencia, disponibles para el enlace y otras interacciones. En el silicio sólido, cada átomo está rodeado por otros cuatro átomos dispuestos en forma de tetraedro; los átomos están enlazados entre sí por pares compartidos de electrones de valencia. El material puede hacerse conductor por dopado, o inyección, de elementos de impureza.

El funcionamiento de un transistor bipolar o de un FET depende, en gran medida, de la calidad del cristal original de silicio. Pueden desarrollarse cristales relativamente uniformes y libres de defectos por medio de una técnica conocida como proceso de Czochralski. Se llena un crisol con silicio y se mantiene a una temperatura superior en unos 100 grados al punto de fusión del silicio, que es de 1685 grados Kelvin (1412 grados Celsius). Un pequeño cristal de silicio se sumerge, entonces, como semilla en el silicio fundido. Este cristal se eleva lentamente del material fundido, haciéndolo girar simultáneamente. Mientras se va elevando, los átomos de silicio de la masa fundida se van pegando a él. El tamaño del cristal crece hasta que alcanza sus proporciones finales, unos 150 milímetros de diámetro hoy en día y posiblemente 200 milímetros en un futuro previsible.

Es difícil obtener diámetros mayores, ya que las corrientes incontroladas de fluido en el silicio fundido hacen perder la uniformidad a los cristales. Estas corrientes se originan en diferencias de temperatura y densidad en la masa fundida. Para moderar el movimiento del fluido, los investigadores están estudiando la posibilidad de introducir el crisol en un campo magnético. Además, como la gravedad es una de las causas de estas corrientes, un experimento atractivo a llevar a cabo en una estación espacial sería el crecimiento de cristales con un diámetro extremadamente grande.

Tras el desarrollo del cristal, éste se corta y se pule para formar obleas, generalmente tan lisas que la altura de su superficie varía en menos de 10 angstrom, 10^{-9} m, de punto a punto. Esta distancia viene a corresponder a la longitud de una cadena de diez átomos de hidrógeno consecutivos.

El cristal está, entonces, listo para convertirse en un circuito integrado. El procedimiento para obtener un simple FET pone de manifiesto la complejidad de la tarea con que se enfrentan los fabricantes de futuros dispositivos. Primeramente, la oblea se calienta hasta unos 800 grados K, en presencia de oxígeno. El calentamiento produce el crecimiento de una fina capa de dióxido de silicio sobre la superficie de la oblea. A continuación, se cubre la superficie con un revestimiento de un polímero conocido como fotorresistor. El patrón del circuito integrado se forma en el fotorresistor, por exposición a radiación electromagnética o a partículas cargadas, decapando luego las zonas superfluas. Este proceso expone una superficie de silicio limpia en zonas seleccionadas y definidas.

La oblea se dopa, contamina, seguidamente con iones (átomos cargados), para producir, debajo mismo de su superficie, regiones que tengan propiedades electrónicas diferentes de las del silicio. Uno de los efectos nocivos del bombardeo iónico es que éste daña el cristal de silicio. Para restablecer el cristal en su condición original, se le recuece, o calienta, lentamente. El paso del recocido se realiza simultáneamente con el crecimiento de otra capa de dióxido de silicio (con un espesor de unos 300 angstrom) sobre la superficie de silicio limpia. A diferencia del anterior, este óxido debe ser capaz de soportar los altos campos eléctricos –del orden de varios cientos de miles de volt por centímetro– que se aplican a la puerta durante la acción del FET.

A continuación se depositan sobre la oblea diversos metales y aleaciones. Se emplean generalmente tres técnicas: evaporación en vacío, pulverización y deposición química en fase de vapor. En la evaporación en vacío, los átomos que se van a depositar se producen por evaporación de la superficie de un metal caliente colocado en el vacío. Como alternativa, los átomos pueden producirse por pulverización, desalojándolos de la superficie de un metal con un haz de iones pesados (especies atómicas cargadas con gran número de protones y neutrones). En la deposición química en fase de vapor, los gases organometálicos depositan sus átomos metálicos, sea por descomposición, sea por reacción con la superficie de la oblea.

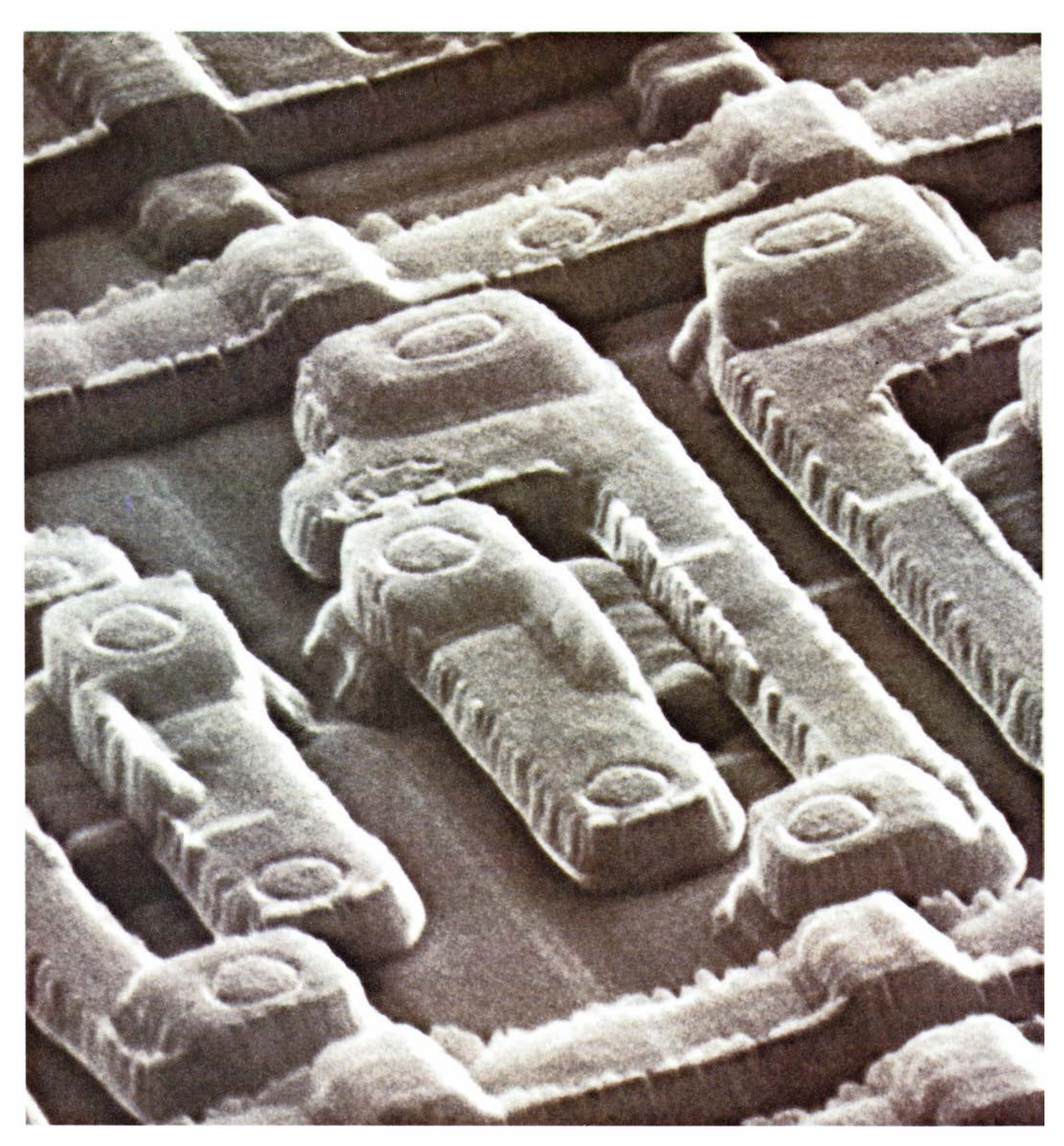
Una vez preparada la oblea, se corta en cierto número de pastillas, cada una de las cuales puede contener hasta un millón de transistores (para aplicaciones en memorias). Las pastillas ("chips") se empaquetan, a continuación, en un recubrimiento cerámico. Hasta hace poco tiempo, el proceso de empaquetamiento se consideraba generalmente una técnica sencilla. Pero eso ya no es cierto. De hecho, el ciclo de tiempo de un ordenador, el tiempo que tarda en procesar un conjunto de instrucciones, está determinado no sólo por la pastilla, sino también por la longitud que recorre la señal para ir de una pastilla a otra. En un ordenador grande, el tiempo de viaje de la señal puede ser bastante largo comparado con el tiempo medio de una operación realizada en una pastilla [véase "Empaquetamiento microelectrónico", por Albert J. Blodgett Jr.; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1983].

Como se ha dicho ya, la velocidad de la actual generación de circuitos integrados puede crecer con la miniaturización de sus componentes. Para

2. IMAGENES DE COMPOSICION de la misma zona de un circuito integrado; revelan la distribución espacial de elementos en la pastilla ("chip"). Empezando por la parte superior izquierda y siguiendo en el sentido de las agujas del reloj, se muestra una imagen electrónica de la pastilla y los diagramas elementales de su silicio, fósforo y aluminio. Las imágenes se tomaron bombardeando la pastilla con un haz de electrones. Algunos de éstos son dispersados por la superficie, siendo la imagen electrónica un registro de estas partículas retrodispersadas. Otros electrones del haz incidente excitan átomos que emiten rayos X. Como la longitud de onda particular de los rayos X constituye un rasgo peculiar de cada elemento, pueden obtenerse diagramas de los diferentes materiales. Las imágenes fueron realizadas en el Instituto de Materiales de Amberes.

grabar estructuras cada vez menores en las pastillas semiconductoras, tendrán que seguirse métodos especiales. En particular, la luz de longitud de onda bastante larga no es adecuada para definir detalles extremadamente agudos en el fotorresistor que cubre la oblea. Para solucionar esta limitación, se substituye la luz por haces de electrones de alta energía. La longitud de onda asociada con los electrones es una fracción del diámetro de un átomo. Este método ha posibilitado la fabricación de las estructuras de anchura de línea de medio micrometro, antes mencionadas.

En otro método en consideración, se utilizarían rayos X de una longitud de onda muy corta para tallar los elementos de un circuito en pastillas. Los rayos X se producirían en sincrotrones, máquinas que aceleran partículas cargadas a grandes velocidades por medio de campos eléctricos y magnéticos. Las



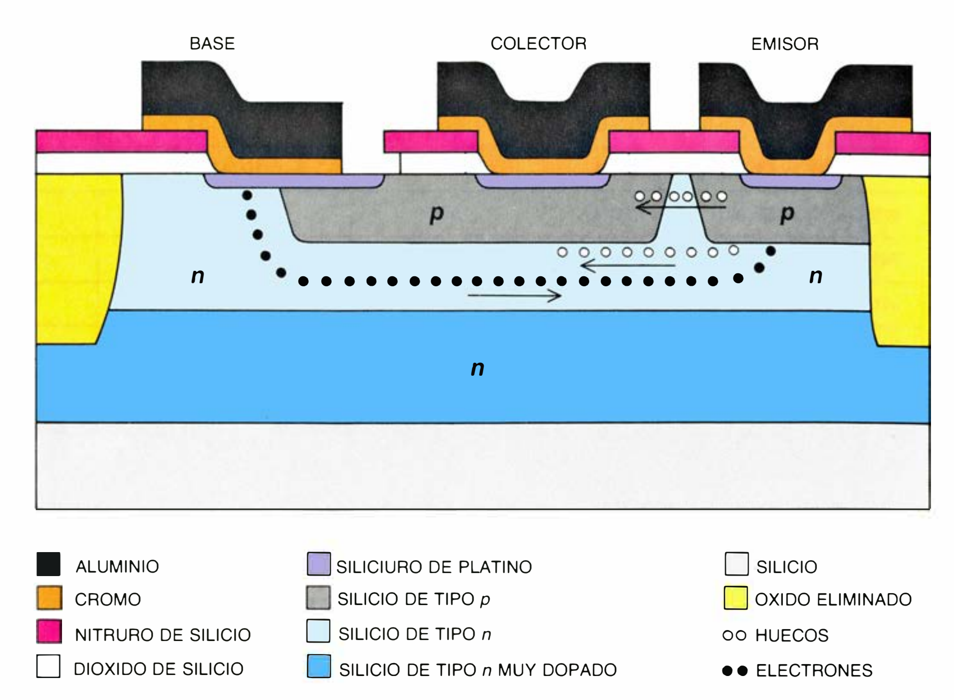
3. CIRCUITO LOGICO de una densidad jamás impresa en una pastilla semiconductora. Se ofrece sólo en parte. La anchura de línea del circuito, o dimensión mínima característica, es de 0,5 micrometros: unas 150 veces menor que el espesor de un cabello humano. La mayoría de las pastillas tienen anchuras de línea de uno a dos micrometros. La alta densidad se logró empleando un haz de electrones en la realización del circuito, en vez del acostumbrado haz de luz. Matthew R. Wordeman, April M. Schweighart, Robert H. Dennard, George A. Sai-Halasz y Walter W. Molzen, del Centro de Investigación Thomas J. Watson de la IBM, y con cuyo permiso la reproducimos aquí, construyeron este dispositivo, que es parte de un circuito mayor: la Red Lógica Programable.

partículas, al acelerarse, emiten grandes cantidades de radiación electromagnética. La longitud de onda de esa radiación puede "sintonizarse" cambiando la aceleración de las partículas. Para que la "litografía" de rayos X sea efectiva habría que desarrollar técnicas de alineamiento de máscaras. Además, los sincrotones actuales adolecen de un tamaño excesivo; serían deseables modelos de dimensiones más reducidas, de la magnitud de una mesa.

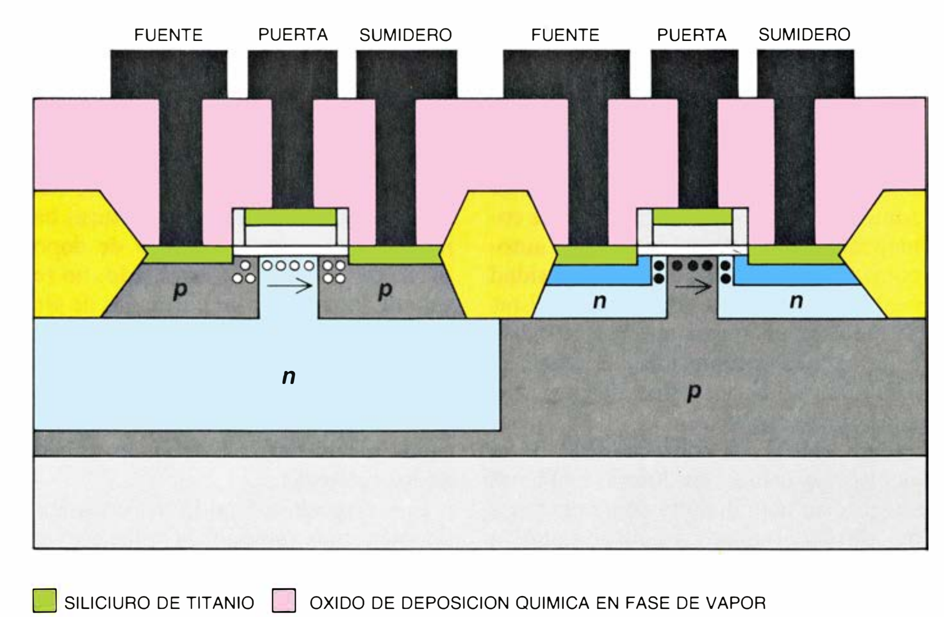
El grabado por plasma es otra técnica en evolución de la que se espera un papel cada vez más importante en la miniaturización. En esta técnica, un haz de plasma –una "sopa" de partículas cargadas que contiene un número aproximadamente igual de iones positivos y electrones– se apunta hacia la superficie de una pastilla. Variando la dirección del haz es posible arrancar los átomos de posiciones específicas de la pastilla. Además de poseer un alto grado de direccionalidad, el grabado por plasma tiene la ventaja de no emplear líquidos que pueden provocar corrosión o quedar atrapados en las cavidades. Ofrece también un inconveniente: el haz energético puede dañar la superficie de la pastilla. Tendrán que desarrollarse plasmas con menores energías o técnicas para eliminar el daño de la superficie.

El empequeñecimiento de un dispositivo genera otros desafíos técnicos a los ingenieros de hoy en día. En este orden, al hacer más pequeño un FET, el aislante de dióxido de silicio de su superficie adquiere mayor finura. Si el aislante se torna demasiado fino, los electrones aplicados para activar o desactivar la puerta pueden pasar por efecto "túnel", fugándose a través de la misma hasta el sustrato inferior. Si lo consiguen, el funcionamiento del dispositivo (diseñado como se hace hoy en día) se resiente. Además, los campos intensos pueden destruir permanentemente el aislante. Por tanto, encontrar aislantes que soporten los campos eléctricos necesarios se convierte en una cuestión apremiante.

Otro problema que puede presentarse cuando se imprime un gran número de elementos de circuito en una pastilla es el de la electromigración: un movimiento indeseado de material a través de las líneas de interconexión, los "hilos" que unen los elementos entre sí. Aunque la cantidad de corriente que fluye a través de un circuito integrado es pequeña comparada con la que lo hace a través de un elec-



4. TRANSISTOR BIPOLAR. Se trata, en esencia, de un interruptor. Aplicando carga eléctrica a una región llamada base, puede "encenderse" o "apagarse" el dispositivo. Cuando el transistor está encendido, fluye corriente eléctrica desde una región llamada emisor hacia otra región llamada colector; cuando está apagado el transistor, cesa el flujo de corriente. En el transistor bipolar que aquí se muestra, la base consta de silicio con "dopado *n*": silicio que contiene electrones adicionales para conducir corriente. El emisor y el colector están compuestos de silicio con "dopado *p*": silicio que contiene "huecos", o sitios vacantes, que se mueven a través del cristal como lo hacen las burbujas en un líquido. Aunque un hueco no sea una partícula real, transporta una carga positiva. En el funcionamiento del dispositivo, el emisor se mantiene a un potencial de cero volt y el colector se mantiene a una tensión negativa alta. Si se aplica una pequeña tensión negativa a la base, los huecos en el emisor con dopado *p* se dirigen hacia el colector. (Algunos huecos son atraídos a la base, mientras que la pequeña tensión negativa en la base lleva electrones al emisor.) Cuando la tensión aplicada a la base se reduce a cero, el flujo de corriente cesa: los huecos del emisor no van hacia el colector.



5. TRANSISTOR DE EFECTO CAMPO (FET) fabricado fijando en un sustrato de silicio tres elementos denominados puerta, fuente y sumidero; corresponden éstos, respectivamente, a la base, el emisor y el colector del transistor bipolar. En la figura se muestran dos FET: uno de canal *p* (*izquierda*) y otro de canal *n* (*derecha*). Cuando se aplica una tensión negativa a la puerta de un FET de canal *p*, los huecos del sustrato son atraídos hacia ella, creando un canal de conducción debajo mismo de una capa aislante de dióxido de silicio. El canal permite que otros huecos de la fuente fluyan libremente hacia el sumidero. Cuando cesa la tensión, los huecos del sustrato se hunden en el material y se detiene la corriente. El transistor de efecto campo de canal *n* funciona igual, con la salvedad de que una tensión positiva (en vez de negativa) aplicada a la puerta atrae una capa conductora de electrones (en vez de huecos) debajo mismo de la superficie aislante.

ESCALA DEL DISPOSITIVO	ABREVIATURA	NUMERO DE CIRCUITOS POR PASTILLA	DIMENSION MINIMA CARACTERISTICA (MICROMETROS)	DESARROLLADO EN LA DECADA DE:
INTEGRACION DE PEQUEÑA ESCALA	SSI	1–100	10	1960
INTEGRACION DE MEDIANA ESCALA	MSI	100–1,000	5	1970
INTEGRACION DE MUY GRAN ESCALA	LSI	1,000–10,000	3–1	1980
INTEGRACION DE MUY ALTA ESCALA	VLSI	>10,000	<1	1980
INTEGRACION DE ULTRA GRAN ESCALA	UHSI	?	.1–.001	?
ELECTRONICA MOLECULAR	—	?	.001	?

6. MINIATURIZACION de los dispositivos electrónicos. Ha continuado a un ritmo notable, según manifiesta la tabla. Al hacerse más pequeños los transistores, se puede alojar un mayor número de ellos en las pastillas. Los circuitos UHSI podrían ser diferentes de los dispositivos descritos en nuestro artículo.

trodoméstico, la densidad de corriente, o cantidad de corriente por unidad de área transversal, es varios órdenes de magnitud mayor. En general, la densidad de corriente aumenta, al menos, por el factor en el que se miniaturiza el dispositivo; en algunos casos, la densidad de corriente aumenta con el cuadrado del factor de miniaturización.

Una línea electrónica típica cuya superficie transversal sea de 10^{-8} centímetros cuadrados podría transportar una corriente de una centésima de ampère; esto corresponde a una densidad de corriente de un millón de ampère por centímetro cuadrado. En comparación, un hilo que va de un enchufe eléctrico a un electrodoméstico puede tener una superficie transversal de 10^{-4} centímetros cuadrados y transportar una corriente de un ampère: la densidad de corriente es de sólo 10.000 ampère por centímetro cuadrado.

Gracias a su magnitud, las densidades de corriente de los circuitos integrados pueden conducir a un desplazamiento real de material de una a otra zona de una línea metálica. Una vez comenzada, la electromigración es autoconsistente; es decir, como la densidad de corriente en las zonas desprovistas de material es mayor que la que existe en las zonas enriquecidas, se desplaza más material de las zonas desprovistas a las enriquecidas.

Para anular las consecuencias de la electromigración, las líneas metálicas se fabrican actualmente con aleaciones de cobre y aluminio. El cobre tiende a retardar el esparcimiento no deseado de átomos de aluminio, por precipitación de un compuesto de cobre-aluminio a lo largo de los caminos de más rápida difusión. No obstante, a pesar del éxito de las líneas de cobre-aluminio en la actual generación de dispositivos, no se espera que la electromigración baje hasta un nivel aceptable en las futuras pastillas integradas, que tendrán densidades aún mayores de elementos de circuito. La búsqueda de nuevos materiales para resolver estos problemas continúa.

Se supone que se podría aumentar la densidad de los componentes de los circuitos, haciéndolos más rápidos, si se construyeran dispositivos tridimensionales. En el diseño actual, la acción tiene lugar, sobre todo, cerca de la superficie de la oblea de silicio. La mayor parte del cristal sirve únicamente como sustrato. Aunque no se conoce en qué cuantía los dispositivos tridimensionales serían más rápidos, los investigadores están explorando la posibilidad de construir los circuitos por estratificación de un plano encima de otro.

Los planos podrían construirse por evaporación en vacío o por deposición química en fase de vapor, técnicas tradicionales para depositar metales y aleaciones sobre las obleas. Las capas de silicio se insertarían entre capas aislantes de fluoruro de calcio, por ejemplo. El dispositivo, sin embargo, tendría que construirse a temperaturas bajas, para que, en el proceso de deposición de un plano determinado, no resultara dañado por las partículas de alta energía el plano directamente inferior. En una posible aplicación de este dispositivo tridimensional, la capa superior contendría sensores ópticos y las capas inferiores procesarían las señales de luz recibidas.

Los dispositivos podrían funcionar, también, más rápido si la velocidad intrínseca de conmutación, o transporte eléctrico, fuera, a su vez, más rápida. Los semiconductores fabricados con arseniuro de galio (en vez de silicio) presentan inherentemente esta notable propiedad. Para comprender el porqué, deben tenerse en cuenta consideraciones mecanico-cuánticas.

A escala de las dimensiones atómicas, los electrones se comportan como si fueran ondas, en un ejemplo específico de la dualidad onda-partícula de toda la materia y la radiación. Cuando las "ondas electrónicas" interaccionan con la estructura atómica periódica de una pastilla semiconductora pueden surgir fenómenos desacostumbrados. En particular, un electrón en un semiconductor se comporta como si su masa fuera mucho menor que la masa de un electrón que viaja en el espacio libre. En el caso del silicio, por ejemplo, un electrón puede moverse como si tuviera una masa cinco veces menor que la de un electrón libre. La masa efectiva de un electrón en arseniuro de galio es, en comparación, unas quince veces menor que la del electrón libre. Esta pequeña masa permite a los electrones moverse en el arseniuro de galio con mayor rapidez que en el silicio.

Los investigadores teóricos suponen que los transistores fabricados con arseniuro de galio podrían adquirir velocidades de conmutación de dos a cinco veces más rápidas que las de los transistores de silicio. Estos transistores podrían configurar ordenadores más rápidos y potentes. La mayor velocidad de los electrones en el arseniuro de galio es también prometedora para la fabricación de dispositivos que puedan amplificar señales de comunicación de alta frecuencia.

El arseniuro de galio es sólo un ejemplo de un semiconductor que puede construirse con los elementos del grupo III y del grupo V de la tabla periódica. El III incluye elementos como el galio, que tienen tres electrones de valencia; el V incluye elementos como el arsenio, que tienen cinco electrones de valencia. Mezclando diferentes proporciones de elementos de los grupos III y V, pueden diseñarse las propiedades electrónicas y ópticas de un material para que se acople a dispositivos específicos. Una forma parti-

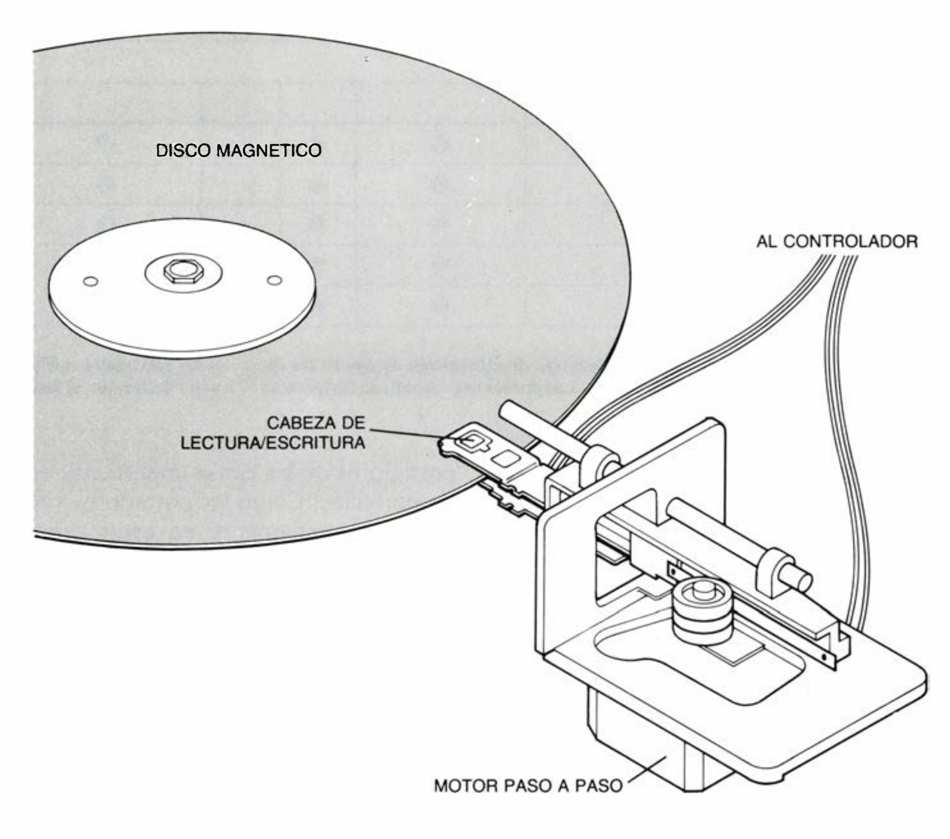
cularmente prometedora de fabricar estos dispositivos compuestos es por heteroepitaxia: haciendo crecer sobre un sustrato cristalino sucesivas películas delgadas de diferentes materiales. La heteroepitaxia ha mostrado ya su notable utilidad en la fabricación de superredes: redes periódicas que constan de capas alternativas de dos semiconductores diferentes. Esto ha llevado también al desarrollo de nuevos dispositivos electrónicos y optoelectrónicos, como los transistores bipolares de heterounión y los láseres de inyección de heterounión.

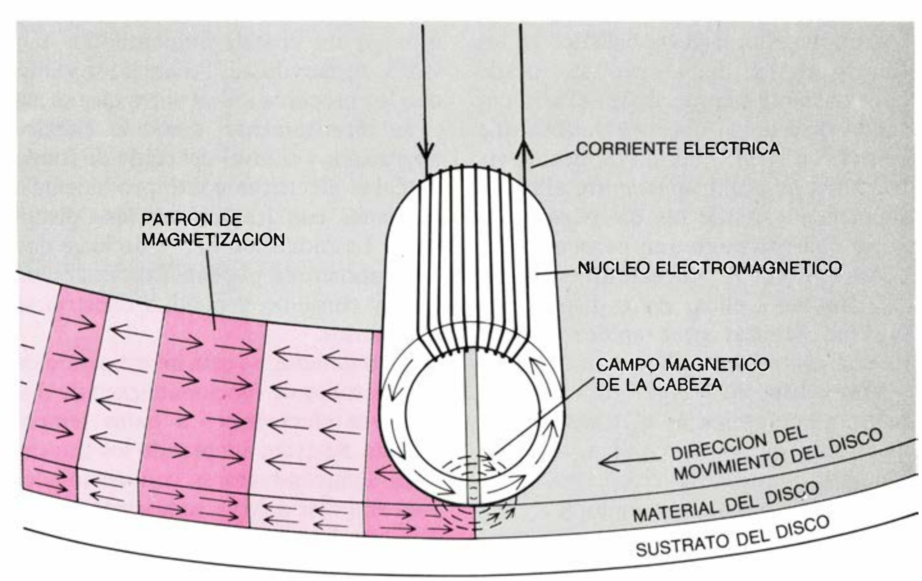
Las tres maneras de formar películas epitaxiales son la epitaxia en fase líquida, la deposición química en fase de vapor y la epitaxia de haces moleculares. En la epitaxia en fase líquida, se desarrollan películas delgadas sobre un sustrato por enfriamiento de una solución caliente que contiene los elementos deseados. La deposición química en fase de vapor despliega las películas por exposición del sustrato a un flujo caliente de elementos o compuestos gaseosos. En la epitaxia de haces moleculares, las películas se forman dirigiendo uno o más haces térmicos de átomos y moléculas hacia el sustrato, que se mantiene en un sistema de vacío altísimo. Esta última técnica ofrece, quizás, el mayor control sobre la deposición de capas, pero es también la más reciente de las tecnologías y hoy en día se utiliza principalmente en laboratorios de investigación.

Aunque los semiconductores de compuestos pueden mejorar los dispositivos existentes y servir como elementos para otros nuevos, aparecen problemas con el uso de nuevos materiales que contienen elementos diferentes. Como el galio posee tres electrones de valencia y cinco el arsénico, ambos metales tienen propiedades químicas y eléctricas radicalmente diferentes. La determinación de las características de la superficie del compuesto presenta un problema de muchos cuerpos que es difícil de resolver. En virtud de ello, la búsqueda de elementos adecuados con los que pueda realizarse el contacto con el semiconductor resulta difícil. Es también complicado fabricar sustratos de arseniuro de galio que estén libres de defectos. Además, aunque se solucionasen todos los problemas técnicos, el proceso de miniaturización continuaría, si bien se haría en dicho caso con materiales distintos del silicio.

Además de esas técnicas recientes y en expansión, objeto de cuanto llevamos dicho, existen varias fronteras exóticas. Divísase, en particular, un efecto muy interesante cuando se reducen los dispositivos: el movimiento de los electrones en su interior cambia drásticamente. Al aplicar un voltaje a través de un semiconductor, se somete a los electrones a un campo eléctrico que los acelera. En un cristal grande, las impurezas y los defectos dispersan los electrones y los retardan, de manera que acaban viajando con una velocidad constante en la dirección del campo eléctrico.

Los efectos retardadores se hacen despreciables cuando las dimensiones del cristal se aproximan a la distancia media entre centros de dispersión. Los





7. DISCO Y CABEZA MAGNETICOS (*arriba*) son los elementos básicos de la memoria permanente de un ordenador. El disco está hecho de aluminio y revestido con una capa de óxido de hierro. Para grabar los datos, el disco gira alrededor de su eje a una velocidad de hasta 3000 r.p.m. Mientras gira, la cabeza se acerca, enviándose una corriente a través de la bobina que la envuelve (*abajo*). La corriente genera un campo magnético en la bobina, magnetizando una zona particular de óxido de hierro del disco. Esta zona conserva su magnetización y "recuerda" los datos. La información almacenada se recupera invirtiendo el procedimiento: las zonas magnetizadas inducen una corriente en la bobina al barrer la cabeza sobre el disco.

MATERIALES	UNIDAD CENTRAL DE PROCESAMIENTO	DISCO	CINTA	COMUNICACION	TERMINAL	PANTALLA	IMPRESORA	CO-PIADORA
SEMICONDUCTORES	●			●		● (color)		● (color)
SUPERCONDUCTORES	● (color)	● (color)		● (color)				
MATERIALES MAGNETICOS		●	●				● (color)	● (color)
METALES	●	●	● (color)	●		●	●	
CERAMICAS	●	●	●	● (color)		● (color)	● (color)	
POLIMEROS	●	●	●			●		●
TECNICAS DE FABRICACION								
DEPOSICION EN FASE DE VAPOR/PULVERIZACION	●	●		●	● (color)		● (color)	
ELECTROQUIMICA	●	● (color)		●	● (color)			
IMPLANTACION DE IONES	●	● (color)		●				
QUIMICA DE RADIACIONES	●	●		●				
TALLADO Y UNION POR LASER	●	● (color)						

8. AMPLIA GAMA de materiales y técnicas de fabricación de uso en las diversas facetas de la industria electrónica. Los puntos negros indican las técnicas y los materiales utilizados actualmente; los puntos de color muestran su posible destino en el futuro. (La tabla ha sido preparada por George Retseck.)

defectos del cristal ya no impiden el movimiento de los electrones, que ahora pueden acelerarse libremente. Los transistores fabricados con estos cristales deberían, por tanto, tener altas velocidades de conmutación: deberían responder rápidamente cuando se aplica una tensión de entrada a la base o a la puerta. Como los electrones que se mueven con tanta celeridad viajan de forma semejante a las balas disparadas por un rifle de gran potencia, los dispositivos se denominan transistores balísticos.

Aunque el transporte balístico en los transistores se había previsto desde hace bastante tiempo, hasta el año pasado no se había observado, cosa que ocurrió en IBM. Podrían fabricarse estructuras de multicapas, entre ellas las superredes, donde los electrones viajaran balísticamente, en perpendicular a los planos de la película, así como paralelamente a ellos. Estos dispositivos podrían alcanzar gran rapidez y grado de compactación.

Otro dispositivo que está despertando vivo interés es el transistor de electrones de alta movilidad, o HEMT. Un HEMT consta de muchas capas de arseniuro de galio, por ejemplo, cuya composición varía de una capa a otra. Un tipo de capa puede tener pocos defectos o impurezas; es, por tanto, relativamente "perfecto". Insertadas alrededor de estas capas, hay otras imperfectas que contienen especies dopantes y que aportan portadores de carga. Regulando la composición de la capa, se provoca la penetración de los portadores de las capas imperfectas en las perfectas. Como los portadores viajan más rápidamente en estas capas que en las imperfectas, la estructura de emparedado posibilita una alta concentración de portadores que presenten alta movilidad.

Los circuitos integrados alcanzarían mayor celeridad si trabajaran a bajas temperaturas. Cuando la temperatura disminuye, es menos probable que los portadores de carga se dispersen con los fonones (vibraciones de los átomos en un cristal) aumentando, por tanto, su movilidad. Además, se retardan los procesos indeseables que se activan térmicamente, como la electromigración, y el nivel del ruido de fondo –señales eléctricas contraproducentes, asociadas con las resistencias– disminuye. La reducción del ruido hace que los transistores puedan funcionar con menor consumo y puedan construirse más juntos.

Actualmente, se está investigando en tres métodos de funcionamiento de dispositivos electrónicos a bajas temperaturas. Se están adaptando los transistores semiconductores convencionales para trabajar a bajas temperaturas. Se está estudiando también la posibilidad de fabricar transistores con semiconductores y superconductores (materiales que conducen electricidad sin resistencia). El tercer método que se persigue, y el más difícil, es el de la fabricación de transistores exclusivamente con superconductores. Todos estos métodos se encuentran en los pasos iniciales de la investigación; queda por ver si se lograrán dispositivos que funcionen.

Las biopastillas ("biochips") representan otra técnica futurista de gran predicamento popular. No existe una definición exacta del término biopastilla. Remite a la fabricación de pastillas con moléculas orgánicas (que contengan carbono) o con moléculas biológicas o de tipo biológico. Puede también aludir a la idea de que una pastilla funcione de manera similar a un organismo natural. Hasta la fecha, ninguna de las definiciones se ha convertido en realidad física. Pero cabe imaginar que algún día sea posible disponer los pares básicos del ADN, el material genético, para almacenar una información tan compleja como una sinfonía de Mahler. Quizás el microscopio de barrido por efecto túnel, que tiene una punta con un único átomo en su extremo, pueda emplearse para almacenar y acceder a esta información. Las técnicas de empalme de genes se aprovecharán seguramente para fabricar el ADN precodificado.

Los materiales magnéticos han contribuido de manera destacada al crecimiento espectacular de la industria electrónica. La razón estriba en que el método dominante para almacenar información en ordenadores –que van desde los prototipos personales hasta los grandes equipos– es la grabación magnética. En una de las formas de esta técnica, un disco rígido de aluminio de 35 centímetros, revestido con óxido de hierro, gira alrededor de su

eje a 3000 revoluciones por minuto. Este promedio de giro corresponde a una velocidad lineal de más de 160 kilómetros por hora en el borde del disco. Mientras el disco gira, se acerca una "cabeza" con la que se "leen" y se "escriben" datos. La cabeza se compone de una bobina que envuelve un núcleo magnético, formado por una aleación de hierro y níquel.

Haciendo pasar una corriente eléctrica a través de la bobina de la cabeza, pueden grabarse datos en el disco. La corriente genera un campo magnético en la bobina que magnetiza una zona específica del óxido de hierro del disco. Esta zona mantiene su magnetización y puede, así, "recordar" la información. El proceso por el que se codifican los datos en el disco se denomina ciclo de escritura. La información del disco se lee con la misma cabeza invirtiendo el procedimiento. Al avanzar la cabeza por el disco, las zonas magnetizadas de éste inducen una corriente en la bobina. Midiendo la corriente en función del tiempo se obtiene la información almacenada.

Aunque los procesos de lectura y escritura se basan en principios sencillos, los intentos para introducir más información en los discos han resultado discutibles. Cuando la densidad de bits aumenta, el campo magnético de cada bit disminuye. Para detectar un campo magnético menor, la cabeza debe colocarse más cerca del disco. Desgraciadamente, las menores separaciones cabeza-disco aumentan la probabilidad de esporádicos impactos catastróficos de la primera sobre el segundo. Además, como la superficie de la capa magnética es normalmente bastante rugosa –del orden de 1000 angstrom–, resulta inevitable el desgaste por fricción.

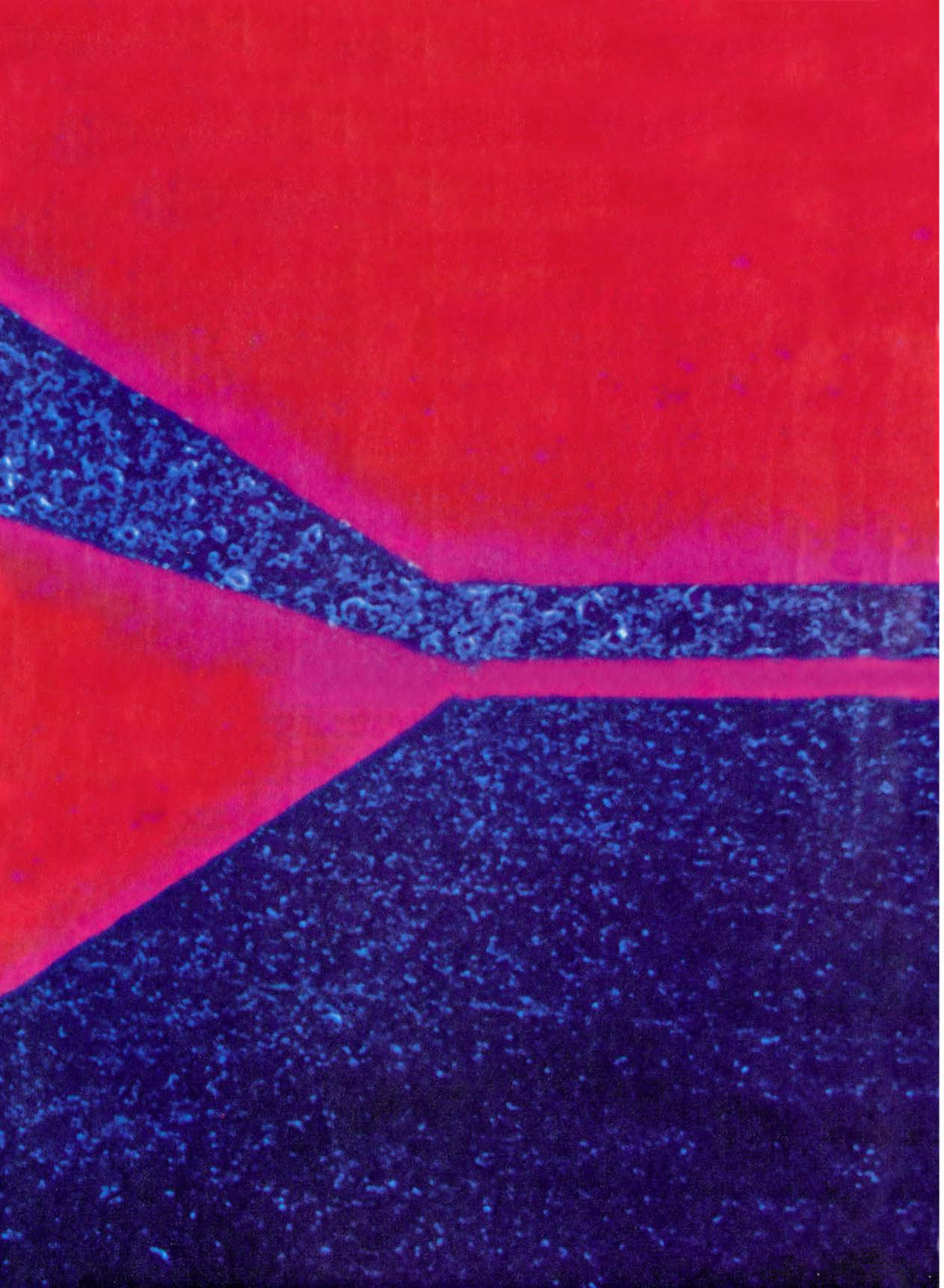
Para reducir el daño de los impactos repentinos del desgaste por fricción, se aplican lubricantes al disco. Desde luego, el segundo efecto puede reducirse también si la superficie del disco se alisa. Para obtener superficies más lisas, los fabricantes de memorias de disco están investigando la posibilidad de aprovechar las técnicas de deposición de películas delgadas, en las que las capas de material se depositan por una técnica de metalización o evaporación. A pesar de la historia afortunada de la grabación por inducción, la tribología de los discos es todavía más un arte que una ciencia.

Para fabricar cabezas que sean más sensibles a los campos magnéticos, los investigadores han comenzado a apropiarse de los materiales y técnicas de la tecnología de las pastillas semiconductoras. En este contexto, IBM ha introducido una cabeza en la que la bobina tradicional se ha sustituido por un conductor de película delgada depositado en espiral sobre la superficie de un sustrato de silicio. El núcleo magnético de la cabeza es de permalloy, una mezcla de hierro y níquel. La cabeza, que forma parte ahora de la memoria de disco IBM modelo 3370, puede responder a variaciones de corriente que se producen a velocidades de hasta 100 millones de veces por segundo. Además, el campo magnético generado por la cabeza es capaz de grabar 6000 bits de información por centímetro.

A largo plazo, sería ventajoso eliminar totalmente la cabeza. Una manera de hacerlo recurre al uso de materiales magneto-ópticos: materiales magnéticos que pueden influir en las propiedades de la luz. Se han investigado varios materiales magneto-ópticos durante las dos últimas décadas. Los más favorables en la actualidad son las películas de aleaciones amorfas que contengan elementos de las tierras raras, como el gadolinio y el terbio, y metales de transición como hierro y cobalto. Mientras trabajaban en IBM a principios de los años setenta, Jerome J. Cuomo, Richard J. Gambino y el autor fueron los primeros que propusieron la utilización de estos materiales. Posteriormente, los investigadores de Japón, Europa y, más recientemente, Estados Unidos, han contribuido al desarrollo de los materiales y a su utilización en la fabricación de prototipos de dispositivos de almacenamiento.

La información se escribe sobre un disco magneto-óptico aplicando simultáneamente un campo magnético y un pulso de luz láser en un punto del disco. La luz láser calienta el punto, mientras que el campo magnético aplicado lo magnetiza. La dirección de la magnetización del punto depende de la dirección del campo magnético aplicado. Para leer los datos, se hace incidir un haz de luz polarizada sobre el disco. La polarización de la luz reflejada cambia según la dirección de la magnetización en cada punto del disco. Midiendo el cambio en la polarización, puede accederse a la información almacenada.

Se están desarrollando también memorias de disco basadas en elementos totalmente ópticos. Se trata, sin embargo, de un campo que cae fuera del objetivo de este artículo.



Materiales fotónicos

Las ventajas que presenta la transmisión de señales luminosas ha conducido a la fabricación de vidrios ultrapuros, aleaciones de semiconductores con espesores de pocos átomos y materiales "no lineales" para las comunicaciones

J. M. Rowell

A raíz de la demostración práctica del funcionamiento de un láser, en 1960, muchos pensaron que tal vez algún día sería la luz, y no las señales eléctricas, el medio ordinario para los intercambios de información. La luz coherente (monocromática) que emite un láser elimina el obstáculo principal de la comunicación por ondas luminosas: las fuentes ordinarias de luz no pueden ser moduladas con la velocidad necesaria para transportar grandes cantidades de información. La enorme capacidad de información de una fuente de luz coherente puso de manifiesto, además, la necesidad de desarrollar una tecnología nueva, análoga a la electrónica, para generar, transmitir, recibir y procesar señales constituidas por fotones de luz en lugar de electrones. Esta tecnología se conoce hoy con el nombre de fotónica. Lo que faltaba en los primeros años de la tecnología fotónica era un conjunto práctico de materiales capaces de responder a sus exigencias técnicas.

A lo largo del cuarto de siglo siguiente, los avances en la fabricación de materiales fotónicos se pueden comparar con los éxitos espectaculares alcanzados en la purificación del silicio para su utilización en electrónica. Un parámetro indicativo es la absorción de la luz en el vidrio. En los 4500 años transcurridos desde que se inicia el uso del vidrio hasta mediados de este siglo, las pérdidas producidas por la absorción de la luz en este medio se han reducido en un factor de 10.000. La mejora ha dado lugar a la transparencia que caracteriza a las lentes de alta calidad, pero la absorción residual todavía era demasiado grande para que el vidrio óptico sirviera de conductor de luz en un sistema de comunicaciones. Como resultado de las demandas de la industria de las comunicaciones, las pérdidas ópticas en el vidrio se han reducido a lo largo de los últimos veinticinco años en otro factor de 10.000. El cristal de un escaparate de cinco kilómetros de espesor construido con el mejor vidrio óptico de guía de ondas sería más transparente a la luz que un cristal ordinario de un centímetro de ancho.

Aunque es el material fotónico más corriente, el vidrio constituye tan sólo uno de los muchos materiales especiales desarrollados para subvenir las necesidades que acarrea la aplicación más avanzada de la tecnología fotónica: la transmisión de información a lo largo de un cable de fibra óptica de vidrio [véase el artículo "Materiales para la información y la comunicación", por John S. Mayo, en este mismo número]. No basta con que un sistema de transmisión fotónica sea capaz de hacer llegar una señal luminosa a grandes distancias; estos sistemas deben también convertir las señales eléctricas en luminosas en el extremo transmisor y la luz en señales eléctricas de nuevo en el extremo receptor. Para realizar estas funciones se han preparado aleaciones totalmente nuevas de semiconductores cuyas propiedades difieren bastante de las propias del silicio. Las nuevas aleaciones se denominan semiconductores III-V, en referencia a las columnas del sistema periódico a las que pertenecen los elementos que las constituyen. Estos materiales se utilizan en la fabricación de múltiples dispositivos: láseres de estado sólido y diodos emisores de luz que producen señales luminosas, repetidores electro-ópticos que amplifican la señal a medida que avanza a lo largo de una fibra y detectores que convierten la señal óptica en un impulso eléctrico. Todos estos dispositivos han contribuido, tal vez incluso más que el vidrio óptico, a desarrollar la comunicación fotónica.

La evolución de la tecnología fotónica ha desembocado en una estrecha relación simbiótica entre la fotónica y la electrónica: la información transmitida exclusivamente por medio de fotones se genera, procesa y almacena en dispositivos en los que fotones y electrones desempeñan un papel fundamental [véase el artículo "Materiales electrónicos y magnéticos", por Praveen Chaudhari, en este número]. Los dispositivos fotónicos puros, capaces de realizar funciones electrónicas diferentes de la simple transmisión de información, no resultan rentables todavía desde el punto de vista económico.

No sería correcto llegar a la conclusión de que los progresos en las comunicaciones hayan limitado el campo de desarrollo de los materiales fotónicos. Por su perfección y complejidad, así como por la elegancia de los métodos utilizados en su fabricación, representan un avance fundamental en la ciencia de los materiales y son susceptibles de ser utilizados en otras aplica-

1. ESTA GUIA DE ONDAS DE LUZ sirve para conectar a los elementos de un circuito sobre una simple pastilla de un material óptico ("chip"). La guía de ondas en cuestión se obtiene mediante un proceso de fotolitografía muy parecido al que se utiliza en la fabricación de circuitos microelectrónicos. La microfotografía, aumentada 1600 veces, muestra una región de dimensiones muy pequeñas de un interruptor electroóptico. El material óptico es un cristal (*en rojo*) de niobiato de litio ($LiNbO_3$); los contactos eléctricos metálicos aparecen en color azul. Una capa delgada de titanio se deposita sobre el cristal a través de una plantilla que reproduce la forma deseada de la guía de ondas. A continuación, el titanio se funde con el cristal. Las regiones contaminadas con titanio marcan en el cristal unos recorridos donde la velocidad de la luz es menor que en el resto del material. El cambio brusco en la velocidad de la luz entre los dos medios provoca que los rayos luminosos que inciden sobre los lados de una guía de ondas sean reflejados y devueltos a ella; la luz queda así confinada en la guía. Se han definido dos de tales caminos: uno de ellos está situado bajo la pequeña banda azul que se observa a la derecha de la microfotografía y el otro se encuentra debajo mismo del primero y paralelo a él, bajo el extremo horizontal de la gran zona azul. La aplicación de un voltaje en los contactos metálicos puede dar lugar a que la luz pase de una guía de ondas a la otra. Muchos confían en que la fotónica será capaz de llevar a cabo otras funciones reservadas hoy a la electrónica, con un rendimiento superior.

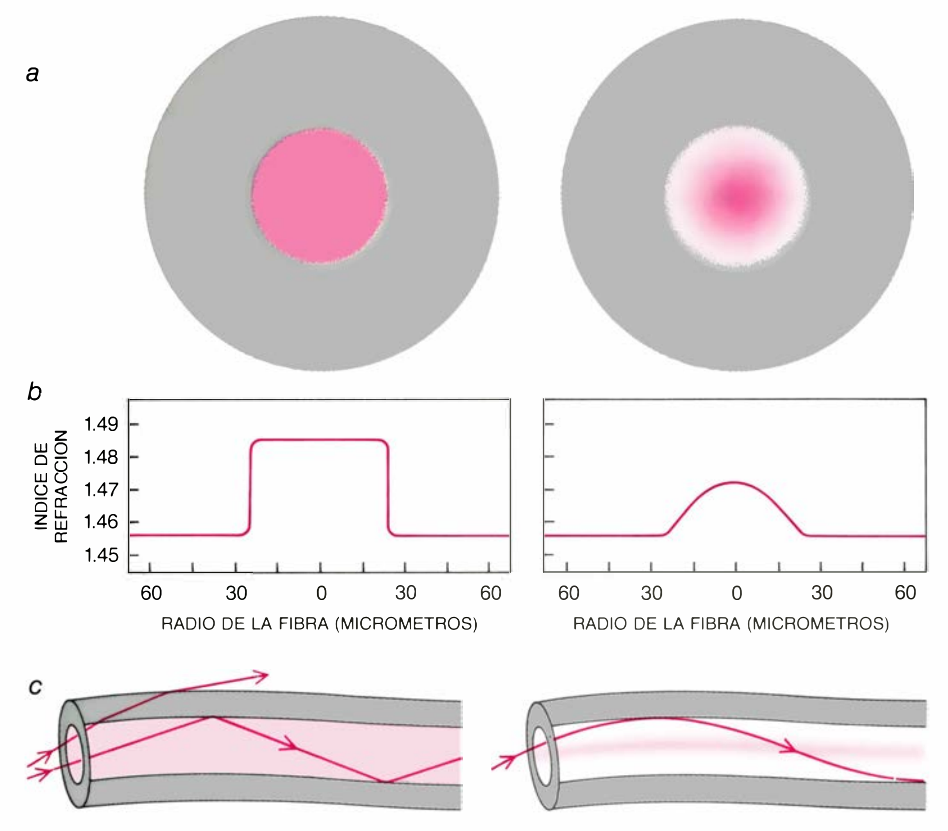
ciones si el mercado lo exige. Una de las más importantes son las ocasiones en que se hace necesario amplificar una señal luminosa sin recurrir a la electrónica, conectarla y desconectarla, o hacerla avanzar según una dirección escogida. Todas estas demandas han estimulado el estudio de los materiales conocidos genéricamente como no lineales: aquellos en los que la cantidad de luz transmitida no es proporcional a la intensidad de luz incidente. La respuesta óptica no lineal se aprovecha para crear en el laboratorio la analogía fotónica de un transistor, o sea, un dispositivo fotónico puro capaz de amplificar una señal de entrada. Enviando un haz de luz sobre un material no lineal convenientemente dispuesto, se pueden obtener también puertas lógicas fotónicas, capaces de dar respuesta a las proposiciones lógicas *y, o* y *no*. Los transistores fotónicos y las puertas lógicas serían los componentes fundamentales de unos superordenadores basados totalmente en la tecnología fotónica, que tal vez sustituyan algún día a los ordenadores electrónicos.

Por ahora, la tecnología fotónica está dedicada fundamentalmente a la fabricación de un enlace con la electrónica que sea eficiente, fiable y de bajo coste. Entre los materiales básicos con que se cuenta para atender estas necesidades se incluye el vidrio, los semiconductores y los materiales no lineales. Los materiales fotónicos, al igual que los materiales electrónicos, no tienen por qué ser sustancias homogéneas en el sentido usual de la palabra. Se trata, por el contrario, de compuestos muy complejos, cuyas propiedades electrónicas y ópticas varían de un punto a otro de manera controlada casi a escala atómica. La composición de estos materiales no puede ser tomada en consideración sin pensar en el modo en que se han fabricado.

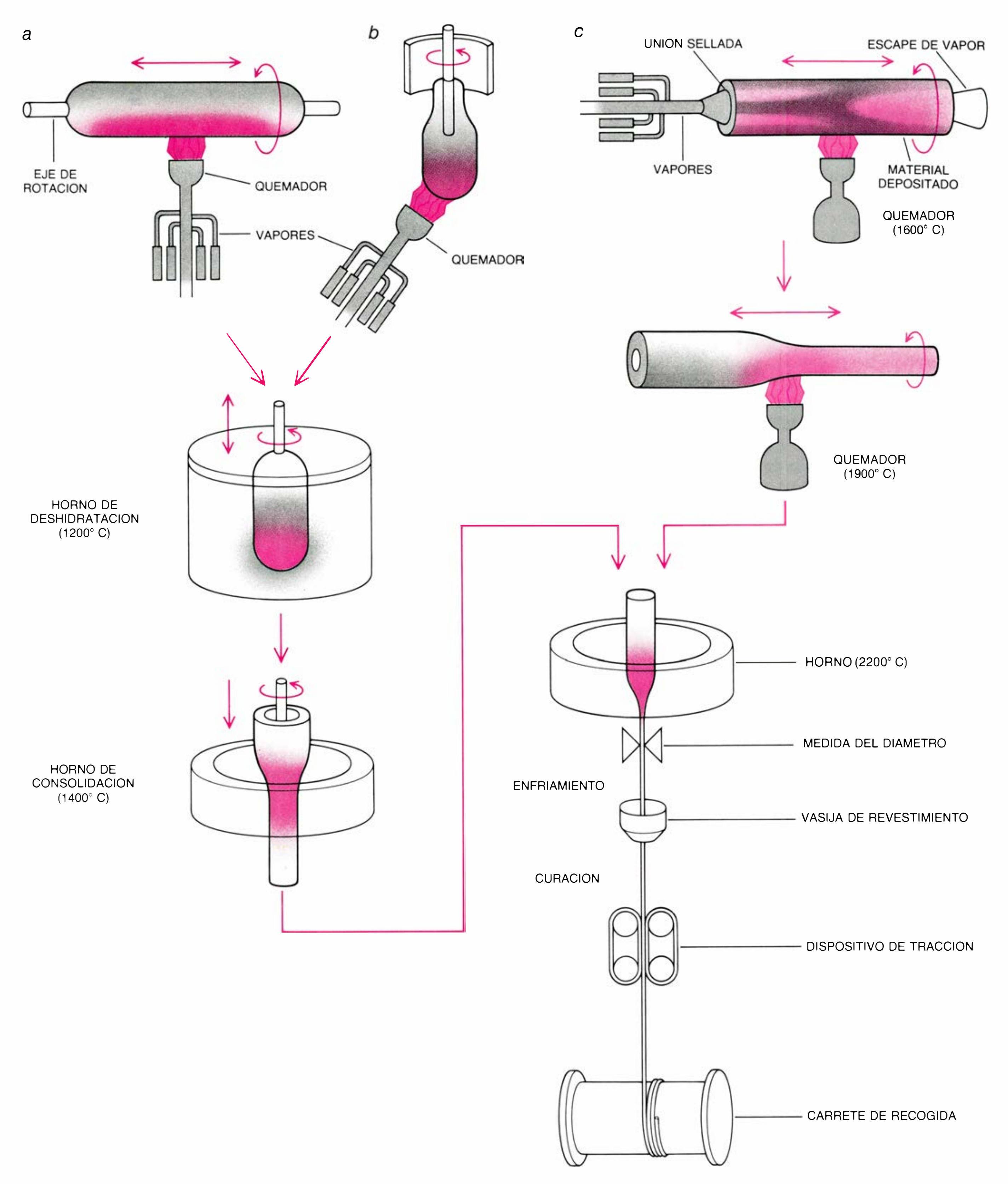
La luz se transmite por una fibra formada por un núcleo central de vidrio, recubierto por otra capa de vidrio; el núcleo conduce la señal luminosa y el revestimiento impide que la mayor parte de la luz se pierda hacia el exterior. En las fibras más sencillas, llamadas de salto de índice, el vidrio del revestimiento está hecho de un material cuyo índice de refracción es ligeramente menor que el del núcleo. (El índice de refracción de un material transparente es el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio considerado; el hecho de que el índice de refracción del revestimiento sea menor que el del núcleo implica que la velocidad de la luz en el revestimiento es ligeramente mayor que en el núcleo.)

Si se ilumina con un destello el extremo de la fibra se produce una serie de haces luminosos que avanzan a lo largo de muchos caminos diferentes en el núcleo o en el revestimiento. Un haz cuyo recorrido forme un ángulo pequeño con la superficie que limita el núcleo y el revestimiento de la fibra resulta totalmente reflejado, debido a la diferencia entre los índices de refracción de los dos medios. En consecuencia, el haz queda atrapado en el núcleo; la reflexión total de la luz, que constituye la base del funcionamiento de estas fibras, es un fenómeno bien conocido desde hace más de 100 años. Si la luz puede viajar a lo largo de más de un recorrido (o modo) de la fibra, se dice que dicha fibra es multimodo. Sin embargo, si el diámetro del núcleo es suficientemente pequeño, tan sólo puede propagarse un rayo: su camino discurre casi en línea recta por el centro del núcleo; en cuyo caso se dice que la fibra es de modo único.

El grado de refinado del vidrio de sílice (SiO_2) que se utiliza en la fabricación de fibras ópticas está aproximándose a los límites intrínsecos impuestos por el propio vidrio. Este logro no es el resultado de una simple intuición o invención, sino la consecuencia de un trabajo esmerado y laborioso para identificar y luego eliminar todos los factores que contribuyen a las pérdidas ópticas. Las impurezas de cobre, hierro y vanadio se han reducido a concentraciones del orden de una parte en mil millones. Las concentraciones de agua e hidroxilo (OH) se han reducido a niveles casi tan bajos como ése. Las dimensiones de la fibra y del perímetro del núcleo se fabrican actualmente con una tolerancia inferior a un micrometro en longitudes de varios kilómetros. Las burbujas y los defectos superficiales han sido punto menos que eliminados.



2. SECCIONES TRANSVERSALES de las dos principales clases de fibras ópticas (*a*). El núcleo de la fibra (*color*) transmite la señal luminosa y el revestimiento de vidrio (*gris*) confina la mayor parte de la luz en el interior de la fibra. El confinamiento depende de la variación del índice de refracción, representado aquí en color (*a*) y en un gráfico (*b*). (El índice de refracción es el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio considerado.) En el caso de la fibra de salto de índice (la de la izquierda de la figura) el índice de refracción cambia bruscamente en el límite entre el núcleo y el revestimiento; los rayos luminosos que inciden sobre este límite bajo un ángulo pequeño son reflejados y devueltos al núcleo (*c*). Los rayos que avanzan formando un ángulo grande respecto al eje de la fibra recorren una trayectoria más larga que los rayos que avanzan en línea recta por el centro del núcleo; la señal se difumina. Se puede contaminar el vidrio con impurezas para que el perfil del índice de refracción adopte una forma parabólica (*derecha*). En estas fibras la mayor velocidad de los rayos en las capas externas del núcleo compensa su mayor recorrido.



3. TRES METODOS utilizados en la preparación de cilindros de vidrio de gran pureza y en el control de la variación del índice de refracción a lo largo del cilindro. En la deposición de vapor en el exterior (*a*), el vapor de un cloruro que contiene silicio reacciona en un quemador de gas y el sílice (SiO_2) que se forma se deposita en la parte externa de una barra de vidrio en rotación. Moviendo la llama o la barra hacia adelante y hacia atrás, se obtiene una apreciable cantidad de vidrio; el índice de refracción de las sucesivas capas de vidrio se altera añadiendo otros cloruros al vapor y controlando la temperatura del quemador. El vidrio se deposita en forma de un hollín poroso. Sería de gran pureza de no ser porque contiene grandes cantidades de agua e iones hidroxilo (OH) negativos. Para eliminar las impurezas, el vidrio depuesto se calienta en una atmósfera de helio y cloro, que reacciona con las impurezas y las extrae del material. A continuación, la temperatura del horno se eleva con el fin de consolidar el producto. La bola se contrae hasta que adquiere su forma final: un vidrio claro y libre de burbujas. En la deposición axial de vapor (*b*) se llevan a cabo las mismas etapas que en el método anterior, con la excepción de que ahora se forma un depósito en el extremo de la barra. En la deposición de vapor modificada (*c*), se procede a calentar un tubo de vidrio hueco desde el exterior mediante una llama en movimiento y los vapores fluyen al interior del tubo. La reacción tiene lugar en las proximidades de la llama y el hollín se deposita a lo largo del tubo. A continuación, la bola se contrae por la acción de la llama. Una vez preparada, la bola se estira para formar una fibra y se recubre con un revestimiento de protección.

Con otros diseños del perfil (o sección transversal) del índice de refracción más refinados que el de la fibra de salto de índice, se ha conseguido también aumentar considerablemente la distancia a la que una señal se puede propagar a lo largo de una fibra sin necesidad de ser amplificada. En una fibra de modo múltiple ocurre que los modos que avanzan según ángulos mayores respecto al eje de la fibra recorren distancias también mayores y sufren cierto retraso. Al cabo de cierta distancia, la señal se difumina, con lo que la velocidad máxima de transmisión, así como la longitud útil de la fibra, resultan notablemente limitadas. Para superar esta dificultad se añaden al vidrio ciertas impurezas, tales como óxido de boro (B_2O_3) o dióxido de germanio (GeO_2), con el objeto de que el índice de refracción varíe de forma parabólica según el perfil transversal de la fibra, desde el interior del núcleo hasta la superficie que limita con el revestimiento. De esa forma, la velocidad de la luz en la fibra aumenta con la distancia radial de un rayo de luz al centro del núcleo y, por tanto, la mayor velocidad de los modos correspondientes a los ángulos más elevados compensa la longitud mayor de sus recorridos. La alteración de las propiedades del vidrio para conseguir este efecto se denomina ingeniería del índice de refracción.

Las limitaciones del vidrio relativas a su empleo como medio de bajas pérdidas de transmisión están originadas tanto por sus propiedades macroscópicas como a escala atómica. Dado que el vidrio es intrínsecamente un material desordenado, inevitablemente resulta difundida cierta cantidad de luz en virtud de las fluctuaciones estocásticas en la composición y densidad del vidrio. Estamos refiriéndonos a la difusión de Rayleigh, llamada así en recuerdo de Lord Rayleigh; su cuantía varía de forma inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda. Por eso, su efecto se reduce para las longitudes de onda mayores; es decir, a medida que avanzamos hacia la región del infrarrojo en el espectro de las ondas electromagnéticas. De acuerdo con el mecanismo de Rayleigh, el cielo se tiñe de rojo en los atardeceres porque la luz roja resulta menos difundida que la luz azul.

Otras pérdidas inevitables tienen lugar a escala atómica, ya que la luz de ciertas longitudes de onda produce transiciones atómicas desde el estado fundamental hasta un estado excitado. Cada transición absorbe un fotón de luz. La luz ultravioleta genera excitaciones electrónicas: los electrones del vidrio pasan a un estado de mayor energía y se absorbe un fotón cuya energía es igual a la diferencia entre la energía del estado final y la del estado inicial. La luz infrarroja produce excitaciones vibracionales: los enlaces entre los átomos de silicio, oxígeno y contaminantes que constituyen el vidrio se comportan como muelles capaces de vibrar en resonancia con las frecuencias de los infrarrojos; por cuya causa, los fotones de infrarrojos resultan absorbidos.

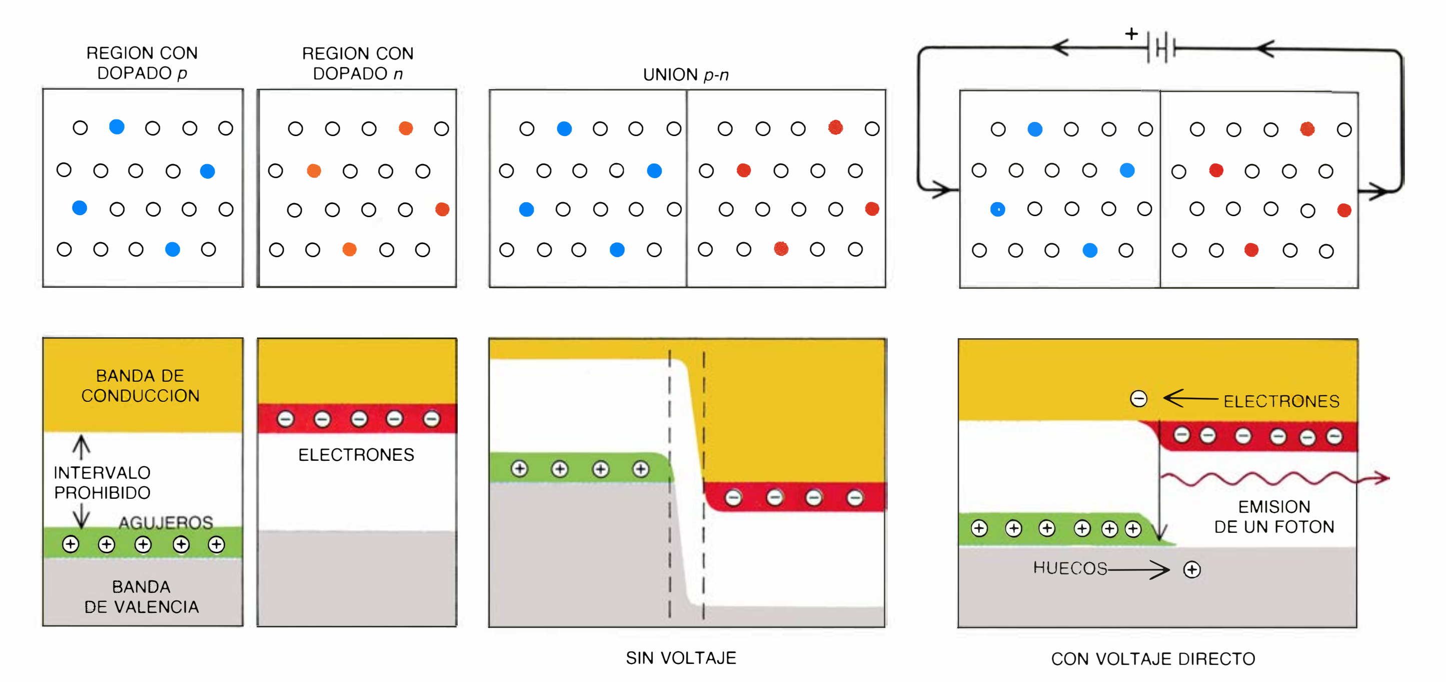
El mecanismo de la absorción vibracional sugiere una forma de reducir todavía más las pérdidas ópticas, aunque las fibras que se fabrican actualmente satisfacen las demandas de las telecomunicaciones para todas las líneas de transmisión, salvo las más largas. Para los átomos cuya masa supera la de los átomos de silicio y para los enlaces interatómicos de menor "rigidez", la frecuencia de resonancia de la absorción infrarroja disminuye. Cuanto menor es la frecuencia, mayor es la longitud de onda. Si se pudiera llevar a cabo una transmisión sin pérdidas importantes para longitudes de onda grandes, la difusión de Rayleigh sería menor a la vez que se reduciría la absorción de la luz producida por las excitaciones electrónicas. En consecuencia, los tres mecanismos de absorción intrínseca se podrían reducir al mínimo inyectando luz infrarroja de menor frecuencia que la habitual en una fibra que poseyera las propiedades atómicas adecuadas.

Algunos materiales, como el fluoruro de zirconio (ZrF_2), el triseleniuro de arsénico (As_2Se_3) y el ioduro potásico (KI), contienen átomos de masa atómica bastante elevada débilmente enlazados; son, pues, relativamente transparentes a las radiaciones infrarrojas con longitudes de onda comprendidas entre los 2000 y 5000 nanómetros. Por ser, además, cristalinos dichos materiales, la difusión de Rayleigh no tiene lugar. Las dificultades tecnológicas que plantea la fabricación de fibras ópticas utilizando materiales cristalinos están muy lejos de ser superadas; sin embargo, se ha calculado que una señal infrarroja sería capaz de cruzar el océano Atlántico a través de una de estas fibras sin necesidad de ser amplificada.

Al contrario de lo que sucede con las fibras cristalinas, la fabricación de fibras de vidrio es un arte completamente mecanizado a escala industrial. Una fibra sencilla de sílice ordinario se puede obtener embutiendo una barra de vidrio en el interior de un tubo también de vidrio, perfectamente ajustado, con un índice de refracción menor. Este conjunto se denomina preforma; a continuación, la preforma se calienta con una llama y se estira hasta que su diámetro se reduce a unos 0,1 milímetros. El perfil del índice de refracción de la fibra es idéntico al que poseía la preforma, pero el perfil de la fibra es 200 veces menor.

II	III	IV	V	VI
	B BORO 5	C CARBONO 6	N NITROGENO 7	O OXIGENO 8
	Al ALUMINIO 13	Si SILICIO 14	P FOSFORO 15	S AZUFRE 16
Zn ZINC 30	Ga GALIO 31	Ge GERMANIO 32	As ARSENICO 33	Se SELENIO 34
Cd CADMIO 48	In INDIO 49	Sn ESTAÑO 50	Sb ANTIMONIO 51	Te TELURO 52
Hg MERCURIO 80	Tl TALIO 81	Pb PLOMO 82	Bi BISMUTO 83	Po POLONIO 84

4. ZONA CENTRAL DEL SISTEMA PERIODICO. Contiene los elementos que se combinan entre sí para dar lugar a compuestos semiconductores binarios, ternarios o cuaternarios. Los números romanos que encabezan las diferentes columnas indican el número de electrones de valencia (los más exteriores) que poseen los átomos de los elementos que aparecen en la columna. Por ejemplo, los átomos de silicio poseen cuatro electrones de valencia. En un compuesto semiconductor puro, el número medio de electrones de valencia por átomo debe ser también igual a cuatro. Un elemento de la columna III, tal como el galio, se puede combinar con un elemento de la columna V, por ejemplo el arsénico, puesto que el número medio de electrones de valencia es igual a cuatro. De forma análoga, el cadmio se puede combinar con un elemento como el teluro. Los números que aparecen en la tabla son los números atómicos, es decir, el número de protones.



5. ESTRUCTURA DEL INTERVALO PROHIBIDO de un semiconductor contaminado o impregnado selectivamente con impurezas; dicha estructura condiciona sus propiedades eléctricas y ópticas. La estructura de los semiconductores de tipo *n* y de tipo *p* por separado se representa a la izquierda de la figura. Los átomos contaminantes, deficitarios en electrones de valencia, dejan "huecos" en la banda de energías asociada con los electrones de valencia del semiconductor. Los huecos cargados positivamente se convierten en portadores libres de cargas que desplazan los estados energéticos de los electrones situados en la parte superior de la banda de valencia; los huecos se mueven dentro del semiconductor de forma análoga a como lo hacen las burbujas de un líquido. En una región *n*, los átomos de contaminantes introducen electrones de valencia adicionales, que se convierten en portadores de carga libres en la parte inferior de la banda de conducción. Si una región *p* se une con una región *n*, los huecos libres y los electrones empiezan a moverse a través de la unión y se recombinan entre sí: los electrones de la banda de conducción atraviesan el intervalo prohibido y llenan algunos huecos de la banda de valencia. Las recombinaciones crean un campo eléctrico en la unión *p-n* que altera la estructura del intervalo prohibido e impide que prosiga la migración y la recombinación (*centro*). Cuando se aplica un voltaje en la forma que se indica, el intervalo prohibido a lo largo de la unión se modifica (*derecha*). Los electrones son empujados hacia la región con contaminación *p* y los agujeros hacia la región con contaminación *n*: electrones y huecos se recombinan. En estas recombinaciones se libera una cantidad de energía igual a la anchura del intervalo prohibido. Dicha energía resulta, en ocasiones, igual a la energía de un fotón visible o infrarrojo.

Uno de los avances más importantes en la fabricación de las fibras ha correspondido a la producción de preformas a partir de vidrios extremadamente puros. Se utilizan ya tres métodos de preparación diferentes y todos ellos permiten un control muy preciso del perfil del índice de refracción. En todos estos métodos se dirige un chorro de vapor de un haluro de silicio –el $SiCl_4$, por ejemplo– hacia el interior o el exterior de una barra de vidrio. Cuando el vapor reacciona con oxígeno o agua, se deposita sílice sobre la superficie interna o externa. Los tres métodos en cuestión se han utilizado en diferentes instalaciones de producción y no existe una tendencia clara a favor de ninguna de las tres opciones.

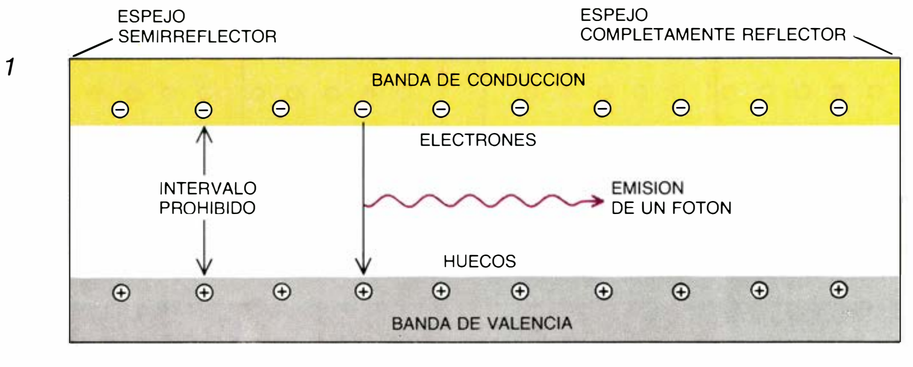
En gran medida, la evolución de los materiales empleados en la fabricación de transmisores y fotodetectores para los sistemas de transmisión por fibra óptica ha corrido paralela a los avances experimentados por las propias fibras. Las fibras primitivas transmitían luz con más eficiencia en la región del infrarrojo próximo, para longitudes de onda del orden de 800 a 900 nanómetros. Tanto el arseniuro de galio (GaAs) como el arseniuro de galio y aluminio (GaAlAs) son capaces de emitir y detectar luz en dicha región, y las fuentes luminosas utilizadas en las fibras ópticas primitivas estaban fabricadas con estos materiales. A medida que mejoraban las fibras, la región de pérdidas mínimas de las transmisiones fotónicas se desplazaba hacia las longitudes de onda del infrarrojo lejano: en un principio para una longitud de onda de unos 1300 nanómetros y más recientemente para una longitud de onda próxima a los 1550 nanómetros. Los emisores y detectores de luz para estas longitudes de onda se pueden construir con una mezcla de cuatro elementos (formando una aleación cuaternaria): fosfuro de arsénico, indio y galio (InGaAsP).

El factor clave en el diseño de estos dispositivos radica en la peculiar estructura de los materiales semiconductores. Como su nombre indica, un semiconductor conduce la electricidad mejor que un aislante, pero no tan bien como un metal. En los átomos de los aislantes, los electrones de valencia (que son los electrones más externos) están fuertemente ligados al átomo. Se necesita una gran cantidad de energía para romper dichos enlaces y conseguir que los electrones se muevan libremente a través del material para promover una corriente eléctrica.

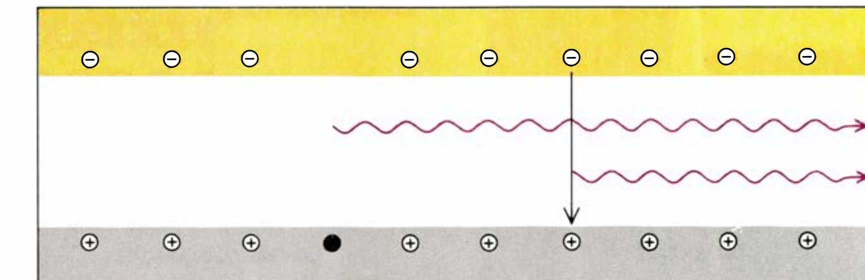
La estructura energética de los electrones de valencia de un aislante se puede representar mediante dos bandas o intervalos de energía. A temperaturas bajas, todos los electrones de valencia están confinados en la banda de energía más baja, conocida como banda de valencia. Por encima de ésta existe un intervalo "prohibido", inaccesible a los electrones, según dictan las leyes de la mecánica cuántica. Por encima de dicho intervalo se sitúa una segunda banda de energía, conocida como banda de conducción. Un electrón de la banda de conducción puede moverse libremente por el material y, por consiguiente, conduce la electricidad; mas para que el electrón alcance la banda de conducción es necesario que absorba una cantidad suficiente de energía que le permita cruzar el intervalo prohibido.

Los electrones de valencia de un metal se mueven libremente y al azar a través del material, de forma parecida a como lo hacen las partículas de un gas. La banda de valencia y la banda de conducción se solapan entre sí y, por tanto, no existe ningún intervalo prohibido entre ellas. Basta la aplicación de un pequeño voltaje entre dos extremos del metal para que los movimientos estocásticos de los electrones libres

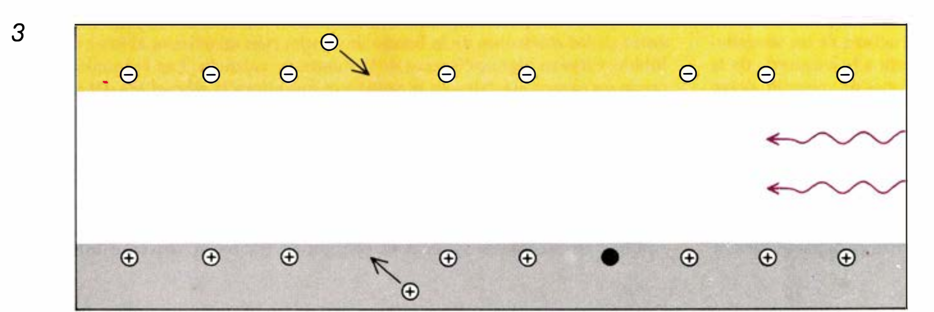
1



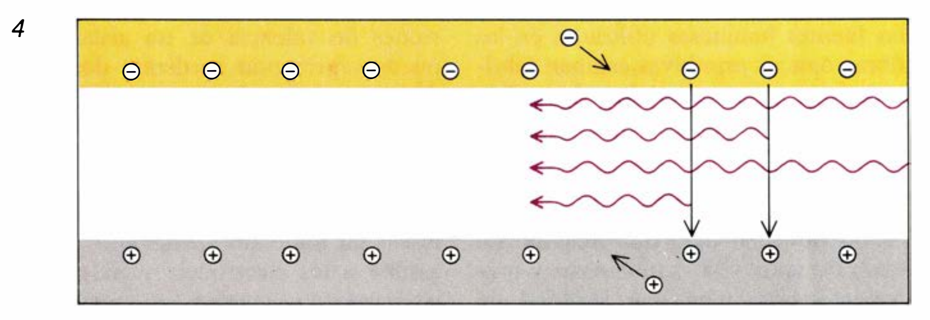
2



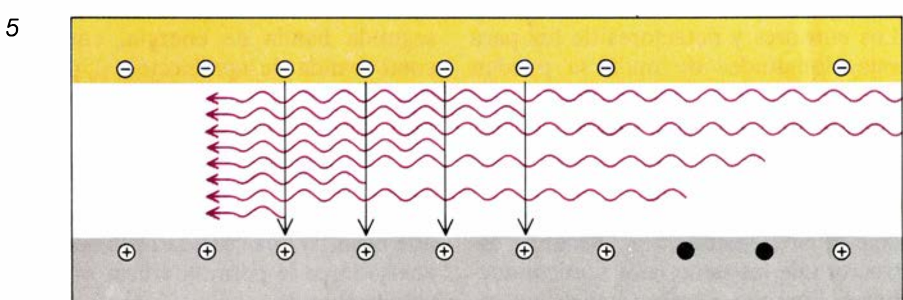
3



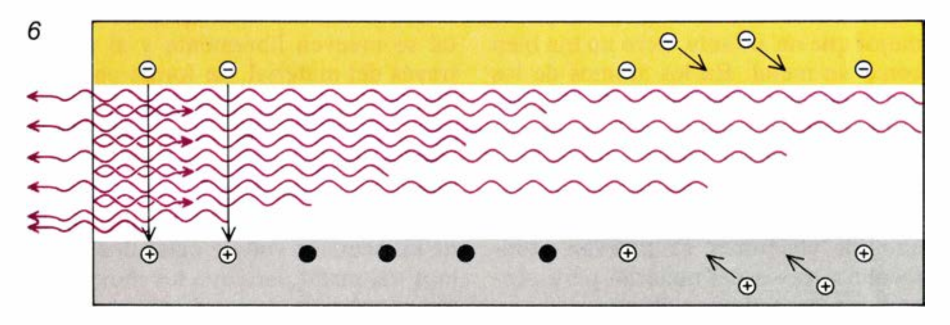
4



5



6

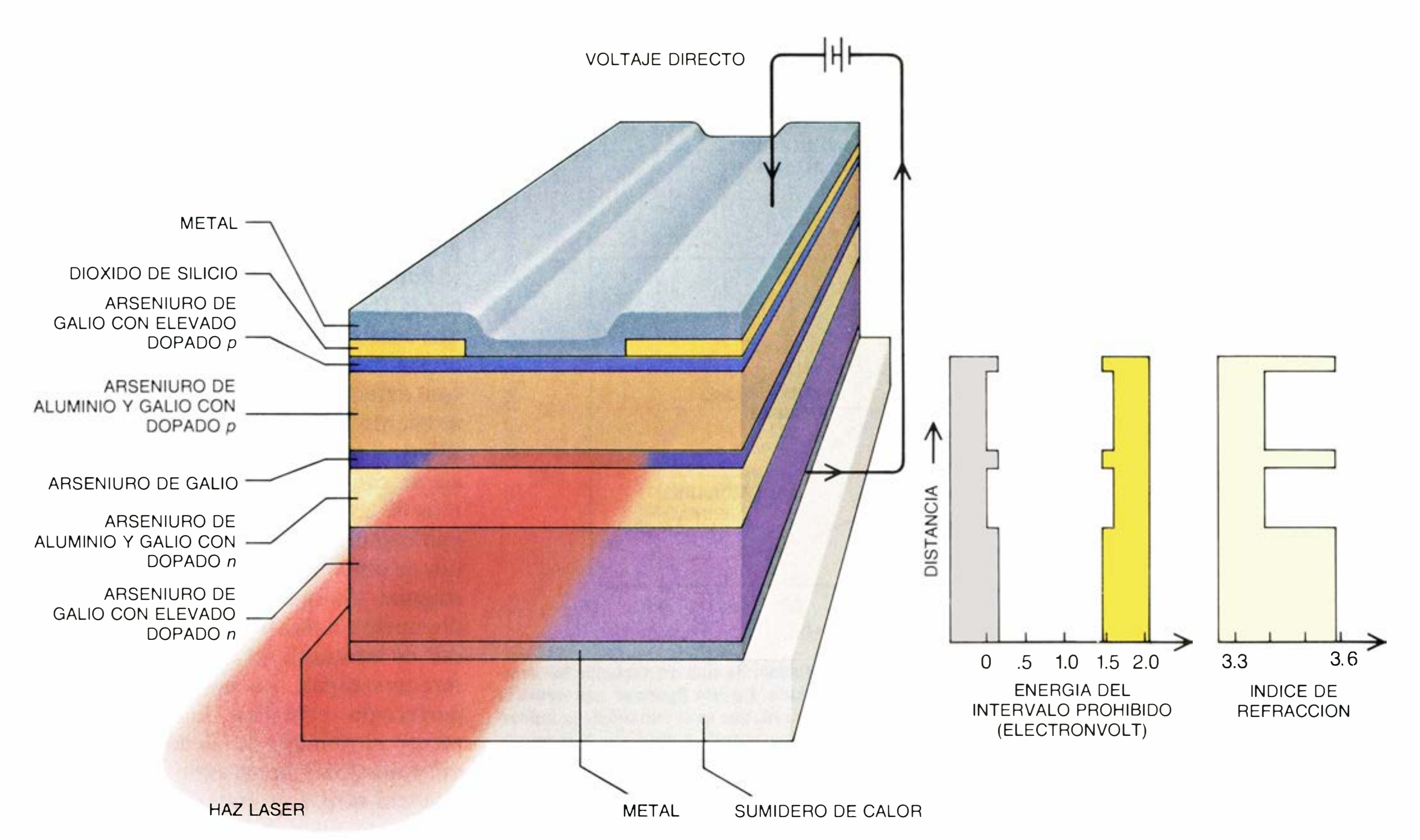


en la banda de conducción se orienten según una dirección determinada y se produzca una corriente eléctrica.

En un semiconductor los electrones de valencia están menos ligados a los átomos que en un aislante; el intervalo entre las bandas es más pequeño que en un aislante, así que la energía necesaria para producir una corriente eléctrica será también menor. Sin embargo, a bajas temperaturas un semiconductor se comporta como un aislante, a menos que se trate de un material bastante impuro. Los electrones de valencia llenan la banda de valencia hasta el tope, pero no existe un solapamiento con la banda de conducción como sucede en un metal. Si se suministra una cantidad de energía suficiente para excitar un electrón hasta la banda de conducción, su ausencia de la banda de valencia produce un "hueco" cargado positivamente. Un hueco se comporta como un electrón libre y puede moverse de un átomo a otro, de forma parecida a como transcurre el movimiento de una burbuja en el interior de un líquido. Cuando se aplica un voltaje a lo largo del semiconductor, se induce una corriente de electrones y otra de huecos en sentido contrario a la anterior.

Entre las propiedades de un semiconductor destaca la relativa al control, muy preciso, de su conductividad eléctrica. Mezclando pequeñas cantidades de impurezas con el semiconductor se le pueden introducir electrones o huecos libres (no necesariamente ambas cosas). En un semiconductor elemental de la columna IV del sistema periódico, pensemos en el silicio, cada átomo de la red cristalina posee cuatro electrones

6. EMISION DE LUZ LASER en un semiconductor; prodúcese en virtud de la recombinación estimulada de los electrones excitados de la banda de conducción con los huecos de la banda de valencia. En este diagrama, un electrón excitado espontáneamente se recombina con un hueco y la energía se libera en forma de un fotón de luz (*1*). Antes de que ocurran nuevas emisiones espontáneas, el fotón emitido estimula la recombinación de un segundo electrón (*2*). Por ser la energía del segundo fotón emitido igual a la del primero, sus frecuencias deben ser también iguales, de acuerdo con las leyes de la mecánica cuántica. Los dos fotones entran en resonancia y se propagan en fase; un espejo situado en el extremo de la derecha del semiconductor (*3*) los devuelve al interior de la cavidad. A medida que van avanzando a lo largo del semiconductor estimulan más recombinaciones, formándose una onda coherente (*4*, *5*). Parte de la luz escapa a través de un espejo semitransparente situado en el extremo de la izquierda, (*6*). El paso de una corriente a través del semiconductor suministra un flujo constante de nuevos electrones y huecos. Por encima de cierto valor umbral de la corriente, se forma una onda de luz coherente y el dispositivo comienza a funcionar como un láser.



7. LASER DE HETEROUNION, constituido por capas de semiconductores de diferente composición y contaminación. La estructura del intervalo prohibido de las capas que rodean la región emisora de luz se ha diseñado de suerte que confine los portadores de carga la luz emitida. Una mayor anchura del intervalo prohibido de las capas que rodean la región emisora de luz impide que los electrones y huecos que entran en ella la abandonen. La luz emitida queda atrapada porque el índice de refracción de las capas contiguas es menor, de forma similar a lo que sucede en el revestimiento de una fibra óptica. (Diseños de G. Retseck.)

de valencia. Cada electrón es compartido por dos átomos vecinos. En consecuencia, cada uno de los átomos está rodeado por ocho electrones compartidos, exactamente los necesarios para llenar los estados de energía disponibles en la capa electrónica más externa de los átomos en cuestión.

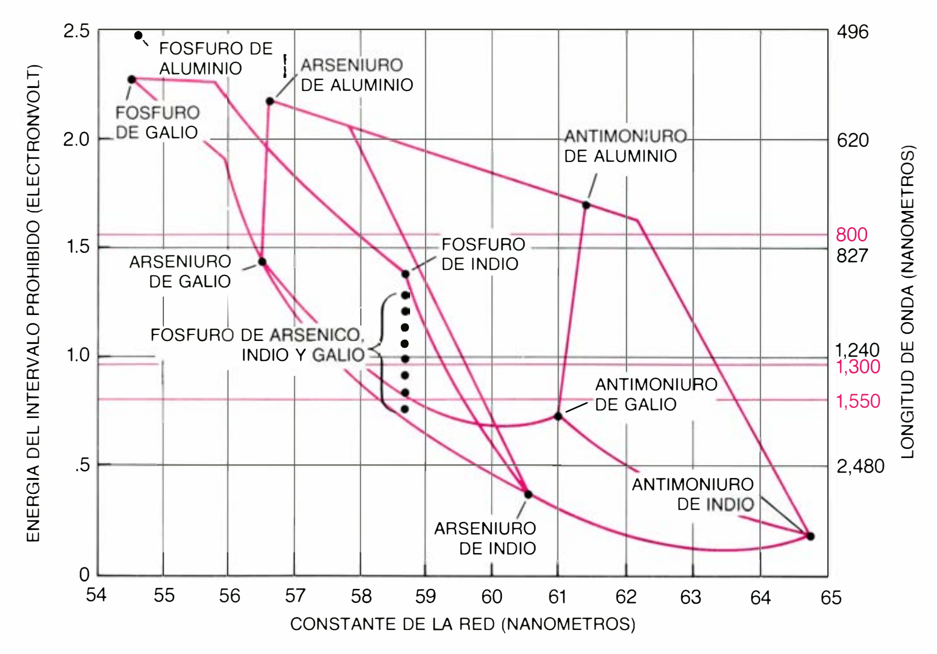
Cuando se añade al silicio una pequeña cantidad de un elemento de la columna V del sistema periódico, por poner un caso, la aleación resultante contiene electrones libres. Esto se debe a que un átomo de arsénico, por ejemplo, posee cinco electrones de valencia; por cada átomo de arsénico que se añada al material se introduce un electrón adicional que no encuentra sitio en la capa más externa de ningún átomo de silicio. Dado que este proceso de contaminación o "dopado" ("doping") introduce cargas negativas libres se denomina contaminación de tipo *n*. De forma análoga, cuando el silicio se carga con un elemento de la columna III del sistema periódico, el silicio contaminado contiene huecos libres cargados positivamente. Así, un átomo de galio posee solo tres electrones de valencia: por cada átomo de galio existe un hueco, es decir, la ausencia de un electrón. La contaminación con un elemento con menos electrones de valencia, tal como el galio, se denomina contaminación de tipo *p*.

Los semiconductores contaminados y no contaminados se pueden obtener también a partir de aleaciones. En este orden, si un elemento que posee tres electrones de valencia, como el galio, se mezcla en proporciones iguales con un elemento que posee cinco electrones de valencia, como el arsénico, el número medio de electrones en la capa más externa de los átomos sigue siendo cuatro. La contaminación de una aleación como el arseniuro de galio se puede llevar a cabo mezclando los dos elementos en proporciones desiguales. Las aleaciones semiconductoras formadas por elementos con tres y cinco electrones de valencia son los llamados materiales III-V a los que nos hemos referido anteriormente.

Si en un semiconductor existe un cambio brusco entre una región con contaminación *p* y una región con contaminación *n* se forma una unión *p-n* o diodo [*véase la figura 5*]. Al formarse esta unión, los electrones libres de la región con contaminación de tipo *n* son atraídos eléctricamente por los huecos libres de la región con contaminación de tipo *p* y los dos tipos de partículas se recombinan en las proximidades de la unión. Un electrón cae desde la banda de conducción hasta un agujero de la banda de valencia, el agujero desaparece y se libera una cantidad de energía igual a la energía del intervalo prohibido entre ambas bandas. Sin embargo, tras producirse algunas recombinaciones, la región de tipo *n* queda cargada positivamente y la región de tipo *p* negativamente. En virtud de la repulsión electrostática, ya no se produce una ulterior migración de electrones hacia la región de tipo *p* (ni de huecos hacia la región de tipo *n*) y, por el momento, la recombinación de ambas partículas cesa.

Imaginemos ahora que el electrodo positivo de una batería se conecta a la región de tipo *p* y que el electrodo negativo se conecta a la región de tipo *n*. Cuando se aplica un voltaje, los electrones son empujados a través de la unión *p-n* hacia el electrodo positivo y los huecos son empujados a través de dicha unión hacia el electrodo negativo. Electrones y huecos se encuentran en la región de máxima densidad de partículas, que es precisamente la unión, y allí se recombinan. Una vez más, en cada recombinación se libera una cantidad de energía igual a la energía del intervalo prohibido.

Tanto en los diodos emisores de luz como en los láseres, la luz aparece



8. INGENIERIA DEL INTERVALO PROHIBIDO en un semiconductor. Se elabora variando los componentes elementales de la aleación semiconductora de forma controlada. En esta figura se representa la energía del intervalo entre las bandas en función de la constante de la red, que es el tamaño de la unidad básica de la red cristalina. Las líneas que unen los puntos representados en el gráfico muestran la forma en que el intervalo prohibido y la constante de la red varían para mezclas de los compuestos binarios a los que corresponden dichos puntos. Las mezclas son compuestos ternarios. Por ejemplo, se puede conseguir que el intervalo prohibido del compuesto ternario arseniuro de aluminio y galio tenga cualquier valor entre 1,4 y 2,2 electronvolt con tan sólo modificar la relación de galio y aluminio entre los dos extremos representados por el arseniuro de galio y el arseniuro de aluminio. Los materiales dotados de composición diferente que presentan aproximadamente la misma constante de la red, como sucede con estos dos compuestos binarios, se pueden depositar en capas alternas para crear, de esa forma, una red cristalina única. Las longitudes de onda con que se trabaja en tres importantes sistemas de comunicaciones ópticas se representan en color.

como resultado de la recombinación de electrones y huecos que cruzan el intervalo entre las bandas. De esta manera, la anchura del intervalo prohibido en un semiconductor determina la longitud de onda de la luz emitida por ese dispositivo. Dada la estructura particular del intervalo prohibido en el silicio y el germanio, la recombinación en estos materiales da lugar fundamentalmente a una emisión de calor. Por el contrario, en los semiconductores III-V, como son el arseniuro de galio o el fosfuro de indio, la energía de recombinación se libera sobre todo en forma de fotones infrarrojos; estos materiales pueden servir, pues, de fuente de fotones. Por ejemplo, se pueden combinar dos elementos de la columna III del sistema periódico con un elemento de la columna V para fabricar una aleación en la que se conozca el valor del intervalo prohibido: en este caso su anchura poseerá un valor medio entre los correspondientes a las aleaciones binarias constituidas por cada uno de los elementos de la columna III y el elemento de la columna V [*figura 8*].

Los detectores luminosos de las comunicaciones fotónicas se basan también en las transiciones a través del intervalo entre las bandas; pero en este caso las transiciones proceden en sentido inverso. Cuando un fotón incide sobre un semiconductor, excita un electrón y crea un hueco, siempre y cuando su energía sea mayor que la energía de separación entre las bandas. Cuando al semiconductor se le aplica un voltaje, los electrones y agujeros se mueven en sentidos opuestos y originan una corriente susceptible de ser amplificada y registrada. El detector puede construirse con un semiconductor uniforme, pero si se fabrica con una unión *p-n* el campo eléctrico que se crea en torno a la unión contribuye a que los electrones y agujeros excitados se muevan hacia el circuito externo. En los dispositivos conocidos como fotodiodos de avalancha, los electrones y agujeros que se mueven bajo la acción de un campo eléctrico intenso producen más electrones y agujeros; como resultado de este proceso, se refuerza la señal eléctrica detectada.

La elección del material de los láseres, diodos y fotodetectores no viene determinada únicamente por la optimización de pérdidas ópticas en las fibras; la estructura de los dispositivos, y en particular de los láseres, determina también cómo debe ser el material. Las estructuras de los láseres de semiconductores son extraordinariamente complejas. El material utilizado en su fabricación se distribuye en muchas capas delgadas de composición y contaminación diferentes, cuyas propiedades electrónicas y ópticas varían también de una a otra. Estas capas suelen estar separadas por límites bien diferenciados, llamados uniones abruptas, y sus espesores han de estar controlados con gran precisión.

Por otro lado, el crecimiento de las capas (la deposición secuencial) tiene que realizarse de manera que durante el proceso de fabricación no se produzcan defectos que degraden el funcionamiento óptico o eléctrico del dispositivo. Tradicionalmente, esta exigencia se cumple asegurando que los átomos de las capas sucesivas se depositen epitaxialmente, es decir, de forma tal que se obtenga una estructura cristalina singular sin que se produzca ninguna disrupción o distorsión entre los dos lados de las interfases que separan las diferentes capas. La necesidad de esta perfección cristalina limita sensiblemente el número de aleaciones de semiconductores aptas para ser apiladas una tras otra. Los materiales escogidos deben ser tales que sus constantes de red, que miden la repetición de unidades de la red, se parezcan entre sí tanto como sea posible. Aunque las nuevas técnicas parecen sugerir que la necesidad del crecimiento epitaxial se podría relajar un tanto en el futuro, en la actualidad este principio se considera fundamental para la fabricación de materiales funcionales de estructura muy compleja.

Si tomamos de nuevo en consideración la unión *p-n* podremos comprender cuán necesarias son las estructuras complejas. Los electrones y huecos inyectados en la región próxima a la unión en virtud de la aplicación de un voltaje pueden abandonar también dicha unión. Por tanto, si los electrones y huecos no estuvieran un tanto confinados, el número de pares que se recombinarían para producir luz sería pequeño en comparación con el número total de partículas inyectadas. Con el fin de atrapar electrones y huecos en las proximidades de la unión, la anchura del intervalo prohibido en esa región debe ser menor que en el resto del material. Las partículas quedan atrapadas, ya que los niveles energéticos que ocupan en la región de la unión corresponden al intervalo prohibido del material vecino; las partículas no pueden abandonar la región conservando su energía.

Para aumentar la cantidad de luz que emite un láser o un diodo es obligado confinar los fotones producidos por recombinación. En este caso se sigue la

misma estrategia utilizada en la fabricación de una fibra óptica: si el índice de refracción de la región de la unión es mayor que la de las regiones próximas a ella, la luz emitida –que en otro caso pasaría a través de la unión– se refleja y vuelve. Confinando los electrones, los huecos y los fotones en la región de la unión y colocando espejos de alta calidad en los límites de dicha región, se pueden estimular las recombinaciones con más rapidez con la que los fotones se pierden. Las emisiones de luz se hacen coherentes y el dispositivo empieza a funcionar como un láser [*véase la figura 6*]. Procediendo de este modo, los Laboratorios Bell en Murray Hill (Nueva Jersey), a la vez que otros laboratorios de la Unión Soviética, construyeron los primeros láseres de heterouniones de semiconductores capaces de funcionar de forma continua a temperatura ambiente.

¿Cómo se tratan los complejos materiales, epitaxiales y contaminados con la precisión que necesitan estos dispositivos? Para desarrollar una capa de arseniuro de aluminio y galio, por ejemplo, sobre una base de arseniuro de galio, el sustrato se coloca en un medio donde los átomos de galio, aluminio y arsénico se depositan sobre su superficie con una frecuencia que determina la composición de la aleación. Si la temperatura del sustrato se ajusta de forma adecuada, los átomos inciden sobre la base en las posiciones correctas del cristal. Los átomos que llegan más tarde a la superficie inciden sobre otros ya depositados previamente y lo hacen también en las posiciones cristalinas correctas. El espesor de la nueva capa viene determinado por el flujo de átomos incidentes y el tiempo de crecimiento.

El medio en el que el cristal crece puede ser un líquido, un vapor o un vacío elevado. En la epitaxia en fase líquida, se prepara una disolución con el material a depositar en las sucesivas capas y la disolución se enfría hasta que se alcanza la sobresaturación. A continuación, se sumerge el sustrato en dicha disolución y se expone al material disuelto controlando la temperatura. El material disuelto precipita y se deposita sobre la superficie del sustrato.

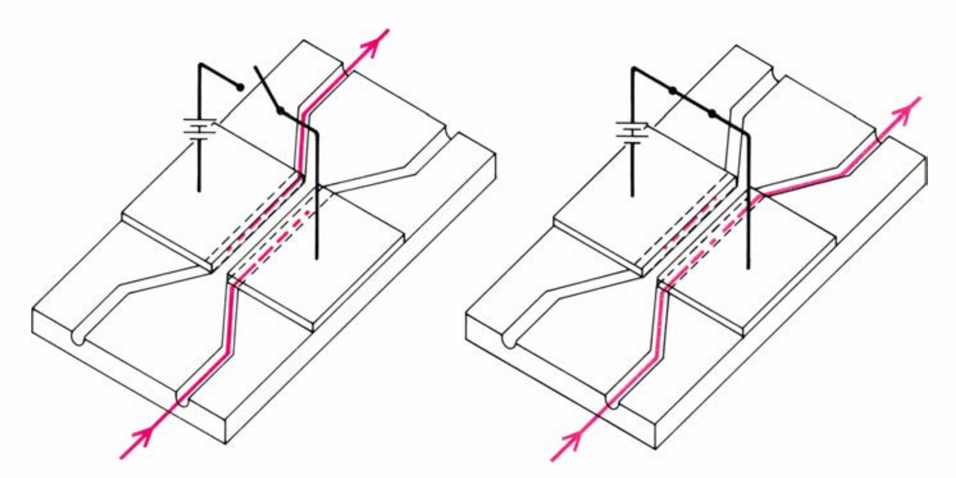
En la epitaxia en fase de vapor, el sustrato se coloca en un tubo y éste a su vez se introduce en un horno. El material a depositar fluye por el tubo en forma de mezcla gaseosa que contiene compuestos volátiles. Estos compuestos se fracturan por efecto del calor y se depositan sobre las superficies más frías o son eliminados con la corriente de gas. Si se necesita modificar el contaminante o el intervalo entre las bandas, se cambian los compuestos de la mezcla gaseosa al cabo de cierto tiempo. Cuanto más rápidamente se cambie la composición de vapor en contacto con la superficie de crecimiento del cristal, más tenaces serán las uniones conseguidas entre las diversas capas. La velocidad del cambio depende, a su vez, del diseño del mecanismo que introduce los vapores, del flujo de gas en el interior del tubo y de la forma concreta en que los vapores llegan a la superficie del cristal y se separan de ella.

Los gases empleados en la epitaxia en fase de vapor, sumamente perjudiciales para la salud, exigen que, en su manipulación, se tomen costosas medidas para garantizar una utilización segura. Dos recientes variaciones del proceso parecen ofrecer algunas ventajas. De acuerdo con la primera, en la deposición de vapores de compuestos organometálicos se introducen los elementos requeridos en el interior del tubo de crecimiento en forma de compuestos ligados a sustancias orgánicas. Así, no revisten, en comparación, peligro alguno. Los radicales orgánicos de las moléculas quedan en libertad a medida que los elementos que constituyen los semiconductores se van depositando sobre el material base. La segunda variación de la epitaxia en fase de vapor se denomina epitaxia con levitación por vapor. En esta variante, los gases y los compuestos orgánicos son similares a los utilizados en la epitaxia en fase de vapor, pero el sustrato, en lugar de permanecer en reposo en el seno de la corriente de vapor, es levitado por dicho vapor.

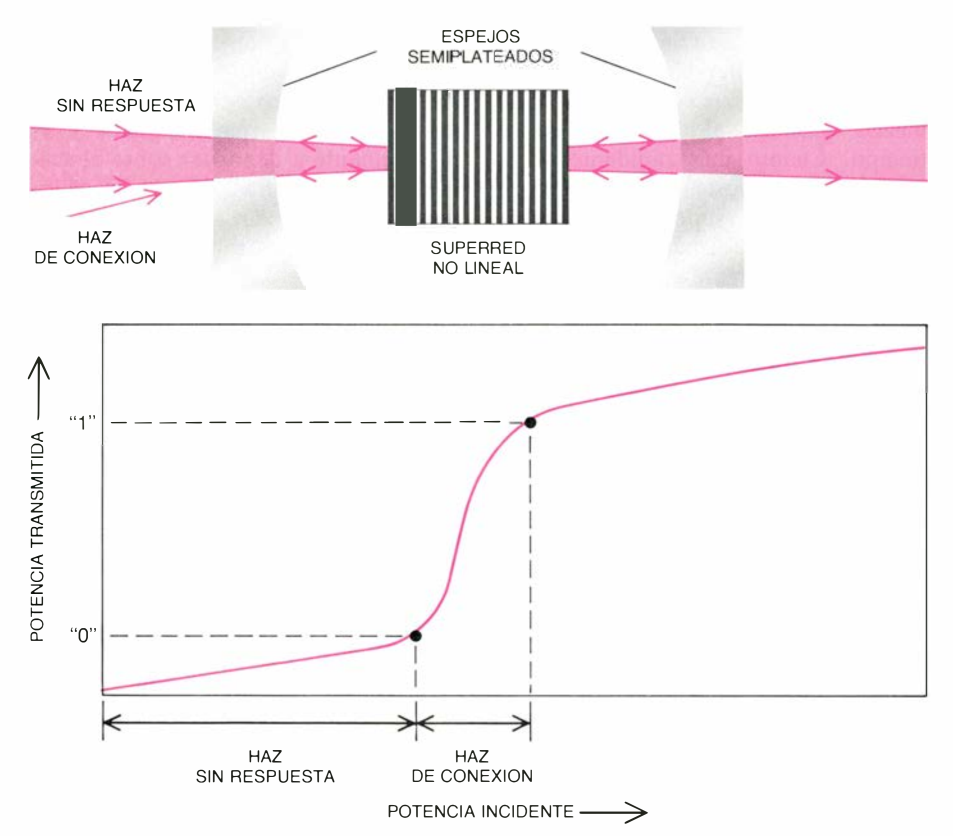
Un tercer método general para el crecimiento de materiales semiconductores complejos se conoce con el nombre de epitaxia con chorros moleculares. El material semiconductor y el contaminante a depositar sobre el sustrato de material base se colocan en un horno y se calientan al vacío hasta alcanzar una temperatura que suele ser superior al punto de fusión. Los átomos se evaporan de la superficie del material calentado y se mueven en línea recta a través del vacío hasta que inciden sobre la superficie del sustrato o las paredes de la cámara de vacío. La deposición se controla con la ayuda de unos obturadores situados entre la fuente y el sustrato; el flujo de cada elemento hacia el sustrato se puede regular también, subiendo o bajando la temperatura del horno. Estos dos procesos suelen gobernarse por ordenador. El crecimiento del material se puede controlar mediante una difusión de electrones sobre la superficie en cuestión. Procediendo de este modo, se logran estructuras de extraordinaria complejidad.

Hasta ahora, ninguna de estas técnicas domina sobre las restantes. La epitaxia en fase líquida ha gozado de amplio uso en el crecimiento de semiconductores para láseres y diodos emisores de luz. La operación es sencilla y relativamente rápida; ahora bien, limitándose a este método resulta imposible producir las finísimas capas que se necesitan en la mayoría de los dispositivos modernos.

La epitaxia en fase de vapor, y en especial la variante que usa compuestos organometálicos, puede acabar siendo el método más utilizado por la industria. El crecimiento del cristal es razonablemente rápido y se puede llevar a cabo sobre sustratos de gran superficie.



9. ESTE INTERRUPTOR ELECTRO-OPTICO es capaz de dirigir el flujo de luz en un cristal de niobiato de litio ($LiNbO_3$). La luz está confinada en las guías de ondas del cristal, definidas por el menor índice de refracción del material que las rodea. Cuando no se aplica ningún voltaje (*izquierda*), la luz que se propaga a lo largo de la guía de ondas inferior interacciona con la guía de ondas superior, y la luz se transfiere de una guía a otra. Si se aplica un voltaje adecuado, la luz permanece en la guía de ondas inferior (*derecha*).



10. LOS TRANSISTORES FOTONICOS se pueden fabricar con un cristal de un material óptico no lineal y un par de espejos semiplateados. La luz transmitida por un material óptico no lineal no es proporcional a la potencia del haz incidente. En este caso, el material es una superred, un material constituido por una serie de capas alternativas de dos aleaciones diferentes. La luz atraviesa el espejo de la izquierda, el cristal de la superred, y es reflejada parcialmente por el espejo de la derecha; la potencia transmitida por el dispositivo se representa en función de la potencia del haz incidente. Se ajusta la potencia de un haz constante de forma tal que su valor se sitúe algo por debajo del umbral a partir del cual la potencia transmitida aumente rápidamente. Si a este haz se le añade un pequeño haz de interrupción, la potencia incidente crece hasta un valor situado justo por encima del umbral. De este modo el dispositivo amplifica la luz del haz de interrupción.

El problema fundamental de estos procesos consiste en que ocurren a la presión de una atmósfera aproximadamente. En estas condiciones, los haces de electrones son difundidos por el gas de la cámara, por lo que dichos haces no se pueden utilizar de la misma forma que en la epitaxia por haces moleculares para controlar el crecimiento del material. Por otro lado, existen ciertos límites intrínsecos a la precisión de la deposición. El flujo del vapor puede ser turbulento, los gases que se utilizan para obtener un límite definido entre las dos capas en crecimiento se pueden mezclar en la cámara y la composición de las capas de gas próximas a la superficie no está perfectamente establecida. Sin embargo, parece ser que estos límites potenciales todavía no se han alcanzado.

Dado que la epitaxia por haces moleculares tiene lugar en el vacío, el método permite la deposición de capas extremadamente delgadas con interfases perfectamente definidas. Sus desventajas consisten en que la velocidad de crecimiento es bastante lenta, la deposición puede variar a lo largo del sustrato en función de la disposición geométrica de las fuentes y la inversión inicial de capital es considerable. Sin embargo, su versatilidad justifica que éste sea el método elegido por muchos científicos, aunque todavía no está generalizado en el sector industrial.

Las diferencias existentes entre los distintos métodos de crecimiento se han reducido últimamente y han aparecido técnicas nuevas. Por ejemplo, la epitaxia en fase de vapor con compuestos organometálicos se puede llevar a cabo actualmente con una presión del orden de una milésima de atmósfera. Un cambio más radical consiste en la deposición de vapor y compuestos organometálicos por epitaxia con haces moleculares. Este proceso híbrido mantiene las ventajas del vacío, pero las velocidades de crecimiento son mayores que en la epitaxia con haces moleculares convencionales y cuesta más cambiar los materiales fuente.

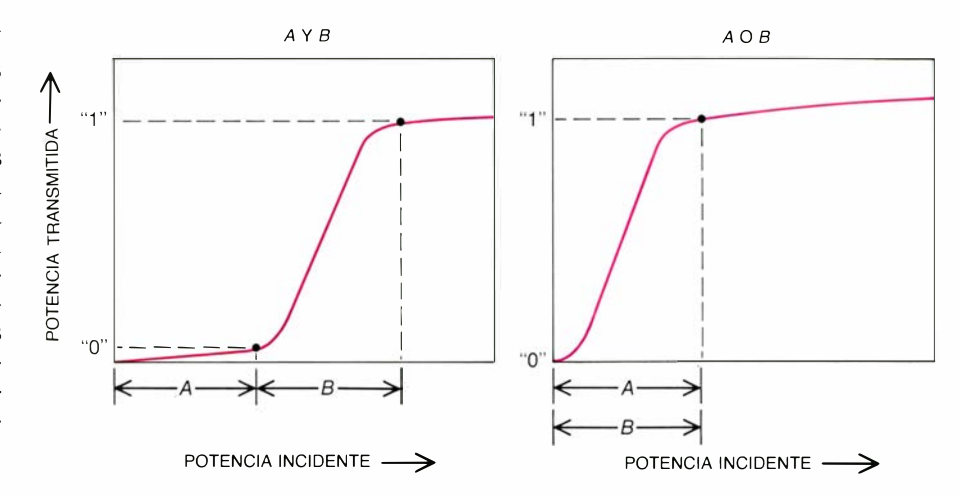
La perfección de las técnicas de fabricación que hemos descrito anteriormente se orientaba en gran parte a la fabricación de láseres de heterounión compleja. Estas técnicas han abierto ya la puerta de lo que se conoce como ingeniería atómica o de intervalo prohibido. ¿Cuáles son las características físicas que puede controlar el ingeniero?

En general, las capas atómicas individuales de un material no se manipulan de una en una, aunque evidentemente éste sea el objetivo último. Sin embargo, la escala típica de variación de las propiedades físicas es de sólo unas pocas capas atómicas. Por ejemplo, el cambio en el intervalo entre bandas, que determina en gran medida las propiedades ópticas de un material, y la contaminación con impurezas, que da lugar a sus propiedades eléctricas, se puede controlar independientemente. Además, la composición de un semiconductor se puede modificar de forma continua: de arseniuro de galio en arseniuro de aluminio y galio; se consigue así que el intervalo entre bandas varíe lentamente a lo largo de una distancia determinada. Si la composición varía de forma brusca varias veces, se obtiene una serie de barreras y pozos de potencial, en períodos brevísimos de un nanómetro. Estas estructuras reciben el nombre de superredes.

Los electrones introducidos en una superred por contaminación sólo se pueden mover en el plano de las capas debido a que los intervalos entre las bandas de las capas próximas, más anchas, crean una barrera de potencial. Por otro lado, la energía de los electrones en la dirección transversal está cuantizada y, en consecuencia, los niveles energéticos y la longitud de onda de la luz que emiten como resultado de la recombinación son diferentes según las capas. En este contexto, las superredes se denominan también materiales de pozos cuánticos múltiples. Las capas se pueden contaminar también de forma tal que los átomos del contaminante se sitúen en las capas barrera y los electrones o los huecos libres se muevan hacia las capas próximas. Este método, que elimina la difusión de los portadores de carga por parte de las impurezas, aumentando la movilidad de éstos, se conoce como contaminación de modulación.

Afirmábamos más arriba que los últimos estudios sobre las técnicas de fabricación ponían de manifiesto que los materiales no necesitaban tener la misma constante de la red para que lograran desarrollarse en capas alternadas. Por ejemplo, se ha demostrado que el arseniuro de galio puede crecer sobre silicio; un material constituido por una serie de capas de estos dos semiconductores reuniría las cualidades

fotónicas de un semiconductor III-V con las conocidas ventajas electrónicas del silicio. Una superred se puede fabricar con dos materiales con constantes de red diferentes, siempre que las capas individuales sean delgadas y la diferencia entre las dos constantes de la red no resulte exagerada. La tensión que se produce entre los átomos situados en capas diferentes genera un cristal perfecto con propiedades distintas de las de cualquiera de sus componentes. Estos materiales se denominan superredes con capas sometidas a tensión.



11. PUERTAS LOGICAS construidas con un transistor fotónico. En el caso de la puerta *y* (*izquierda*), la potencia de los impulsos de la luz incidente se ajusta de forma tal que el umbral de potencia de la superred se supere en el caso único de que se apliquen los dos impulsos a la vez. En el caso de la puerta *o* (*derecha*), el umbral de potencia se ajusta para que se supere cuando se aplica uno cualquiera de los impulsos (o los dos).

Entre las posibles aplicaciones de las superredes de estado sólido, una de las más importantes se basa en su utilización como elemento activo en un circuito fotónico. Un elemento activo de un circuito no se limita a transmitir luz pasivamente, sino que interacciona con ella, generándola, modulándola o eliminándola. Según esto, un elemento activo puede comunicar su estado al resto del circuito. La posibilidad de fabricar ordenadores totalmente fotónicos depende del desarrollo de estos dispositivos.

A escala de laboratorio, los investigadores han demostrado que ciertas superredes de semiconductores III-V y de otros materiales muestran una respuesta no lineal a las señales ópticas. Un pequeño aumento en la intensidad de la luz incidente sobre el material puede producir un incremento importante y repentino en la intensidad de salida [*véase la figura 10*]. El procesamiento de la información fotónica simple se basa en este efecto [*véase la figura 11*]. Sin embargo, no está claro que los materiales III-V sean los mejores que existen, o los mejores que se pueden obtener, para actuar como interruptores fotónicos.

Debemos reconocer que los interruptores fotónicos y otros dispositivos básicos de los ordenadores fotónicos se han desarrollado con bastante lentitud. El único interruptor disponible en el mercado es un dispositivo fabricado con niobiato de litio ($LiNbO_3$), capaz de cambiar el recorrido de una señal luminosa. Este dispositivo se basa en los cambios que experimentan las propiedades ópticas del niobiato de litio tras la aplicación de un campo eléctrico. El material es un óxido cristalino que se obtiene fundiendo pentóxido de niobio (Nb_2O_5) y carbonato de litio ($LiCO_3$) de elevada pureza en un crisol de platino a una temperatura superior a los 1250 grados Celsius. A continuación se sumerge en el material fundido un pequeño germen cristalino y se saca de allí muy lentamente; procediendo de este modo, se puede hacer crecer un cristal de niobiato de litio hasta alcanzar unos ocho centímetros de diámetro. Para homogeneizar sus propiedades ópticas, el cristal se enfría en un campo eléctrico, se corta y se pule.

Para construir un interruptor de niobiato de litio se definen dos guías de ondas, o caminos ópticos, sobre la superficie del cristal. La figura de guía de ondas deseada se obtiene depositando una delgada capa de titanio mediante un proceso de fotolitografía. A continuación, el titanio se funde con el cristal de niobiato de litio debajo mismo del depósito superficial calentándolo a unos 1000 grados Celsius. El titanio residual se elimina y queda un camino óptico de material contaminado con titanio en el sustrato de niobiato de litio. El mecanismo que confina la luz en el cristal es el mismo que el que la confina en el núcleo de una fibra óptica: el índice de refracción de la guía de ondas contaminada con titanio es mayor que la del niobiato de litio envolvente. A lo largo de la superficie discurren dos guías de ondas próximas entre sí, con contactos eléctricos próximos a cada una de ellas. Cuando se aplica un campo eléctrico transversal a dichas guías, su índice de refracción cambia y la luz pasa de una guía a la otra [*véase la figura 9*].

Aunque la tecnología electro-óptica se considera sólidamente establecida en la actualidad, la verdadera tecnología fotónica sólo se encuentra en sus comienzos. La integración de los dispositivos fotónicos constituye un requisito fundamental de una tecnología más avanzada. Por el momento dichos dispositivos son de tipo individual y deben ser conectados de uno en uno. Si se extrapola el desarrollo de la integración fotónica por anología con lo sucedido en la integración de los componentes electrónicos discretos, se puede predecir que el proceso transcurrirá en dos etapas. En primer lugar, los dispositivos ópticos se integrarán con los dispositivos electrónicos asociados con ellos; se está empezando a caminar en este sentido. Más adelante, se construirán circuitos ópticos integrados que no necesitarán ningún tipo de electrónica.

Se pueden esperar otros cambios razonables en los dispositivos y en los medios de transmisión, en los materiales que los constituyen y en los procesos por los que se obtienen dichos materiales. Cabe esperar un avance substantivo en el rendimiento y fiabilidad de los mismos, así como una disminución en el coste de los dispositivos fabricados con semiconductores III-V. A medida que las diferentes técnicas de crecimiento de cristales se vayan aplicando a los materiales no lineales o a los materiales orgánicos, es probable que el diseñador de circuitos fotónicos disponga de propiedades completamente nuevas.

En la última década la fotónica ha experimentado un desarrollo espectacular, que ha exigido cambios revolucionarios en la forma en que se diseñan y fabrican los vidrios, los semiconductores III-V y los materiales no lineales. Aunque es imposible predecir los próximos cambios con absoluta seguridad, existen motivos para creer que conforme progrese la tecnología y su coste mengüe, se producirán avances radicales en los requisitos exigidos a los futuros materiales fotónicos.



Nuevos metales

Mediante nuevas técnicas de fabricación, la metalurgia crea y explota imperfecciones en la estructura cristalina del metal para obtener aleaciones de extraordinaria resistencia a la tracción, el calor y la corrosión

Bernard H. Kear

Los metales pueden ser frágiles o forjables, duros o blandos, de fácil fusión o capaces de aguantar temperaturas extremadamente elevadas. De una manera casi paradójica, las propiedades de los metales se acrecientan con frecuencia exponiéndoles a diversos esfuerzos: un metal puede endurecerse por deformación; por exposición a un grado de calor adecuado, puede hacerse más difícil la disminución de la resistencia mecánica en elevadas temperaturas. La clave de estas propiedades radica en la estructura cristalina que subyace en todos los metales.

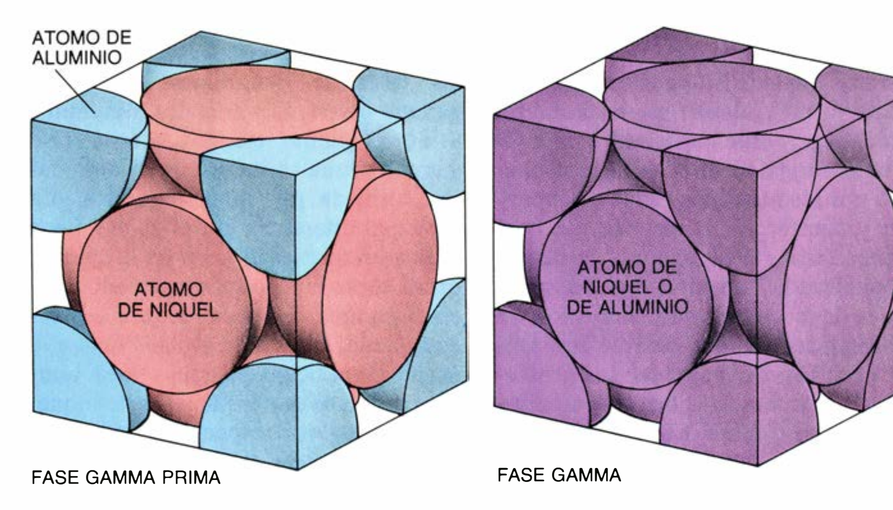
Los átomos de un metal se distribuyen apretadamente, como canicas en una caja. Y siguiendo con la imagen, los átomos tienden a formar planos de máximo empaquetamiento. El modo de colocación de estos planos condiciona muchas de las propiedades de un metal determinado. Aleando un metal –agregándole átomos de otro–, se cambia la disposición de los planos de los átomos, incrementando, a menudo, la resistencia mecánica del producto. Así, el bronce es más resistente que el cobre y el cinc, sus dos metales componentes.

En 1930, los investigadores empezaron a ver que la red cristalina perfecta no podía explicar todas las propiedades observadas. De hecho, ahora resulta evidente que los defectos de la red –los lugares donde los átomos del plano no encajan perfectamente– desempeñan normalmente un papel preponderante a la hora de determinar propiedades tales como la ductilidad, fragilidad y comportamiento a elevada temperatura. Recientemente, la metalurgia ha aprovechado estos conocimientos para desarrollar una nueva generación de modernas aleaciones. Para crear metales modernos, los científicos de los materiales han manipulado deliberadamente la compleja estructura de heterogeneidades e imperfecciones en la estructura cristalina de los metales.

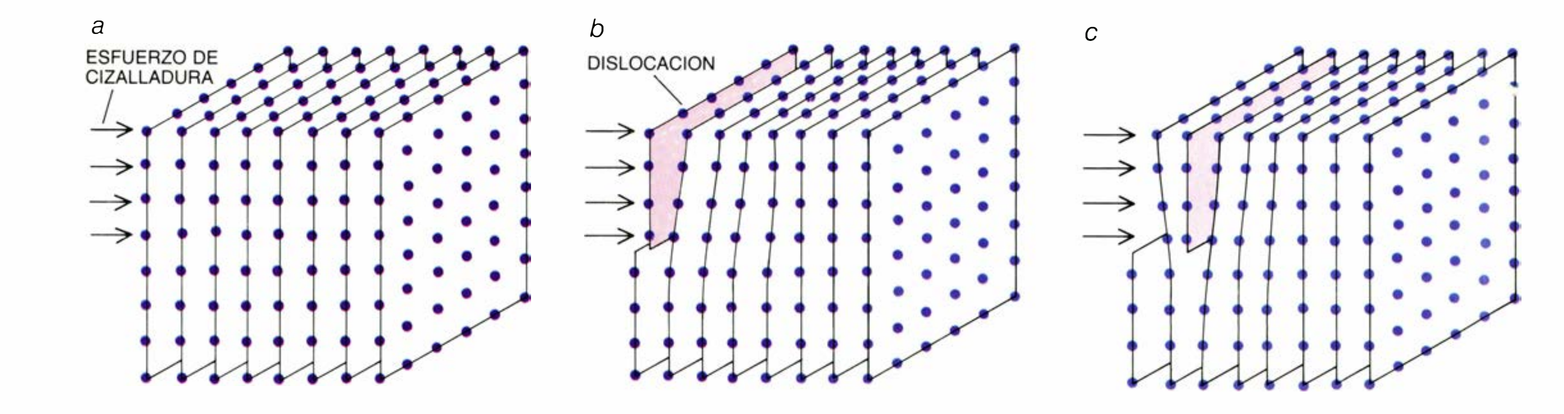
Los metales modernos representan un hito en la metalurgia. Antes, los metalúrgicos se basaban principalmente en ensayos y pruebas para averiguar qué ingrediente debía añadirse y qué etapas del proceso debían seguirse para preparar las mejores aleaciones. Actualmente, se diseñan ya aleaciones mediante técnicas basadas en el conocimiento profundo de la microestructura y de la micromecánica.

Muchos de los metales modernos corrientemente utilizados se desarrollaron buscando una simple aplicación: la turbina a gas, o turborreactor, del avión. Los componentes de una turbina a gas están expuestos a todo tipo de condiciones extremas: temperaturas altas, gases corrosivos, vibraciones y esfuerzos mecánicos elevados debidos a la fuerza centrífuga. Están también expuestos a sutiles tensiones. El aparato arranca, acelera, desacelera y para cada vez que el avión despega y aterriza. La repetición de este ciclo puede conducir a un tipo de fallo conocido como fatiga de baja frecuencia, de la misma manera que al doblar varias veces un alambre se rompe por "fatiga".

El desarrollo de aleaciones modernas ha sido un factor decisivo en la mejora de los turborreactores. El diseño básico de las turbinas de aviones permanece invariable desde hace 30 años. Se han creado metales capaces de resistir mayores temperaturas y mayores esfuerzos; se han incorporado a esta ingeniería y han reemplazado componentes fabricados con otras aleaciones menos adecuadas, incrementando, por tanto, las prestaciones y la fiabilidad.



1. SUPERALEACION DE NIQUEL-ALUMINIO, cuya resistencia débese a la existencia de un conjunto de cristales de cierta fase, o estructura cristalina, incrustados en la matriz de otra fase. Los cristales cúbicos que se aprecian en la micrografía electrónica de la página anterior constituyen la fase gamma prima de la superaleación níquel-aluminio. Se han formado a partir de "celdillas unitarias" con una estructura cúbica centrada en las caras y ordenada (*arriba, a la izquierda*), donde los átomos de aluminio y de níquel ocupan lugares específicos en la red cristalina. La matriz circundante está constituida por la fase gamma (*arriba, a la derecha*), que cristaliza también en el sistema cúbico centrado en las caras, si bien no está ordenado: los átomos de cada elemento ocupan cualquier posición de la red. La estructura cúbica ordenada de la fase gamma prima es resistente a la deformación y endurece la superaleación. La composición aproximada de la superaleación que se muestra aquí es de tres partes de níquel por cada parte de aluminio. La micrografía, de 140.000 aumentos, fue obtenida por David Pearson en el laboratorio de United Technologies.



2. DEFORMACION de un cristal metálico: origina un defecto en la microestructura del cristal denominado dislocación. Cuando un esfuerzo de cizallamiento se aplica al cristal (*a*), aprieta la mitad del plano de átomos exterior izquierdo dentro del material (*b*), hasta empujar al semiplano vecino. Este se rompe y el primer semiplano ocupa su posición (*c*). El semiplano extra en la estructura cristalina se denomina dislocación. Si el esfuerzo de cizallamiento se mantiene, la dislocación continuará avanzando a través del material por el mismo mecanismo de sucesivas roturas y reemplazamientos de semiplanos. Los metales cuyas dislocaciones no se desplazan bien, son más difíciles de deformar: son más duros. En un cristal ordenado, donde las posiciones específicas están ocupadas por elementos particulares (*d*), una dislocación perturba el orden del cristal; por este motivo, resulta difícil que una dislocación se mueva dentro de

Cuando se habla de los nuevos metales, es lógico centrar la discusión en sus aplicaciones. Puesto que la construcción del turborreactor ha constituido una de las principales fuerzas motrices del desarrollo de nuevos metales, y puesto que la ingeniería de una turbina de avión presenta casi todos los tipos de condiciones extremas que han de afrontar los metales modernos, debe estudiárseles en el contexto de las turbinas de gas de los modernos aviones.

Las tres principales secciones de un turborreactor típico son las siguientes: el compresor, la cámara de combustión y la turbina [*véase la figura 4*]. El compresor consta de una serie de discos giratorios provistos de álabes. Estos discos alternan con grandes anillos de álabes estacionarios, que constituyen el estátor, unidos a la carcasa del aparato de modo que reconduzcan el flujo de aire de un conjunto de álabes giratorios al siguiente. El compresor succiona aire hacia el aparato, aumenta su temperatura y su presión y lo inyecta en la cámara de combustión.

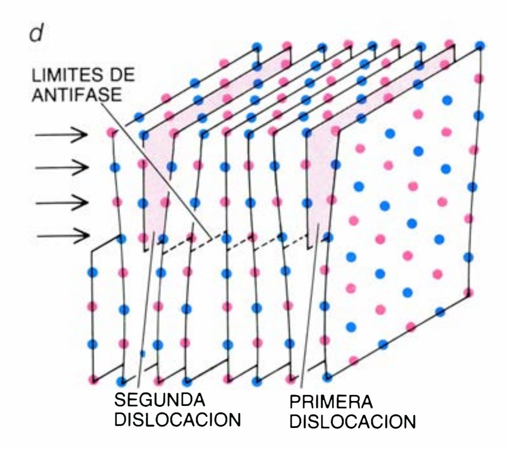
En la cámara de combustión, el aire a alta presión se mezcla enteramente con el combustible rociado formando un conjunto que entra en ignición. Los gases calientes generados se expanden rápidamente. Circulan a elevada velocidad a través de la turbina, formada de álabes móviles y estacionarios, muy parecidos a los del compresor, y se eliminan a través de la boquilla de escape. La elevada velocidad con que los gases abandonan la parte posterior del aparato empuja el avión hacia delante. Cuando estos gases atraviesan la turbina, la hacen girar; la parte móvil de la turbina está conectada al eje del compresor, el cual gira, succionando más aire.

Los distintos componentes del aparato tienen diferentes requerimientos estructurales. Los álabes del compresor, tanto los estáticos como los giratorios, deben resistir las cargas aerodinámicas, y los álabes giratorios, que constituyen el rotor o rodete, deben también resistir la termofluencia, o tendencia a alargarse gradualmente con la fuerza centrífuga. Los discos que forman el rodete deben ofrecer elevada resistencia mecánica para sostener los álabes sometidos a la fuerza centrífuga. La mayoría de los componentes de la cámara de combustión, una construcción más intrincada que el compresor y que la turbina, deben ser hechurables y soldables, y estar capacitados para resistir la fatiga térmica (desgaste causado por los repetidos ciclos de expansión y contracción a elevada y a baja temperatura), la corrosión y la distorsión a elevadas temperaturas. Las aleaciones de la cámara de combustión no necesitan ser particularmente resistentes, pero han de mantener sus propiedades a temperaturas del orden de los 1100 grados Celsius. Los componentes de la turbina, aunque requieren básicamente las mismas propiedades que los del compresor, deben ser también capaces de resistir gases corrosivos y temperaturas muy superiores a las del compresor. Los componentes de todo el aparato poseerán una microestructura muy estable, para mantener así sus propiedades durante largos períodos.

Las aleaciones más idóneas para satisfacer muchas de las condiciones extremas señaladas son materiales basados en el níquel y conocidos como superaleaciones. En una aleación convencional, todos los átomos están distribuidos según una estructura cristalina particular; es decir, todos los planos de átomos están colocados según una secuencia determinada. Corrientemente, una muestra consta de muchos granos, o cristales individuales, unidos entre sí. Las estructuras cristalinas de diferentes granos no están mutuamente alineadas, pero sí lo están los átomos de los distintos cristales, siguiendo siempre la misma pauta.

Por su parte, los átomos de una superaleación están distribuidos en dos o más fases, o tipos de disposición. En las superaleaciones basadas en el níquel, las fases se denominan gamma y gamma prima. Los cristales, diminutos y normalmente cúbicos, de la fase gamma prima se incrustan en una matriz formada por la fase gamma. La principal diferencia entre las dos fases radica en que los átomos en la gamma prima están mucho más ordenados que en la gamma. Es decir, si bien es verdad que los planos de átomos siguen la misma disposición en ambas fases, también es cierto que los átomos de níquel ocupan lugares específicos en cada plano de la fase gamma prima y que otros lugares específicos están ocupados por los átomos del otro metal, que suele ser aluminio. (En la fase gamma prima de la superaleación níquel-aluminio, existen tres átomos de níquel por cada átomo de aluminio.) En la fase gamma, cada tipo de átomo puede ocupar cualquier sitio.

Para comprender las especiales propiedades de las superaleaciones, es ne-



un cristal ordenado. Una segunda dislocación restablece el orden; así, las dislocaciones se desplazan a pares a través de un cristal ordenado. La región entre las dislocaciones tiene más energía que el resto del cristal. La deformación de los cristales ordenados requiere un aporte suplementario de energía.

cesario entender primero cómo se comporta la microestructura de un metal frente a una fuerza aplicada. Supongamos que se aplica una fuerza de cizalladura a una muestra metálica simple; así, un plano imaginario, llamado plano de cizallamiento, la divide en dos partes imaginarias: mientras la parte superior se ve empujada hacia la derecha por la fuerza aplicada, la parte inferior se mantiene estacionaria.

¿Cuál es el efecto de tal fuerza en la microestructura del metal? Imaginemos planos de átomos a cada lado de la muestra que sean aproximadamente perpendiculares a la fuerza aplicada y, por tanto, al plano de cizallamiento. La mitad superior del plano situado en el extremo izquierdo de la muestra se desplazará hacia la derecha, pero la mitad inferior no. Si se aplica una fuerza suficiente, el plano se romperá en dos; la mitad superior izquierda se desplazará un poco dentro de la muestra. Podrá ocurrir que se empuje tanto que fuerce el semiplano vecino, el semiplano en el interior de la muestra. Esto es: el primer semiplano desplaza al segundo, empujándolo hacia el interior de la muestra y ocupando su lugar en el cristal ordenado. El semiplano desplazado desplaza, a su vez, al semiplano vecino, ocupando su lugar.

De este modo, un semiplano adicional se propaga a través de la muestra, con lo que la mitad superior de la muestra acaba por desplazarse hacia la derecha una distancia atómica interplanar. Si la fuerza se mantiene constante, la muestra continuará deformándose. El plano extra que se desplaza a través de la muestra se denomina línea de dislocación.

Un metal duro ofrece dificultades para el desplazamiento de las dislocaciones en su interior y no se deforma tan fácilmente como un metal que permita el libre movimiento de las dislocaciones. La microestructura de las superaleaciones basadas en el níquel dificulta el movimiento de las dislocaciones; por cuyo motivo las superaleaciones son más duras que la mayoría de las aleaciones ordinarias.

La clave de la dureza de las superaleaciones de níquel reside en la presencia de cristales de la fase gamma prima. La fase gamma prima está ordenada: los átomos de níquel y de aluminio ocupan posiciones específicas dentro de la red cristalina. Cuando un semiplano se desplaza ocupando el lugar del vecino, ciertas posiciones atómicas que en el semiplano original estaban ocupadas por átomos de aluminio lo están ahora por átomos de níquel, y viceversa. Esta disposición atómica tiene mayor energía que la fase gamma prima sin deformar, dificultando el desplazamiento de una dislocación a través de la fase gamma prima. (Las dislocaciones se desplazan a través de la fase gamma prima por pares; una segunda dislocación debe moverse a través del material suprimiendo el desorden causado por la primera.)

En una muestra de una superaleación que contenga ambas fases, las dislocaciones se mueven con relativa facilidad a través del material en la fase gamma, pero se frenan y se anclan en los cristales de la gamma prima. Por tanto, las superaleaciones resisten la deformación y son más duras que una aleación convencional.

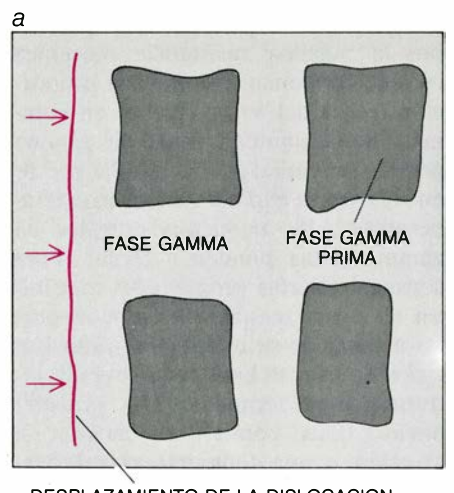
Una superaleación se fabrica fundiendo una pieza de níquel y agregando aluminio. Normalmente, se agrega cierto porcentaje de cromo para proteger de la corrosión al producto final, y pequeñas cantidades de otros metales, así titanio y tungsteno, para aumentar aún más la dureza. Luego, la mezcla líquida se enfría. Aparece una masa de fase gamma de níquel-aluminio, ya que el punto de solidificación de la fase gamma es superior al de la fase gamma prima. Cuando la aleación experimenta un posterior enfriamiento en su estado sólido, precipitan pequeños cubos de fase gamma prima dentro de la matriz de fase gamma.

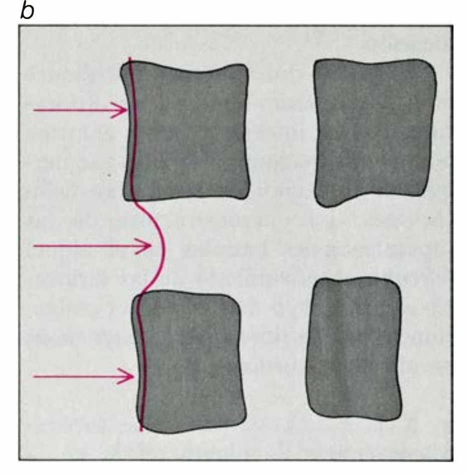
El tamaño final de las partículas de gamma prima se controla variando la velocidad de enfriamiento del material. Las piezas de superaleaciones presentan la máxima resistencia mecánica cuando contienen una elevada proporción (cerca del 60 por ciento en volumen) de diminutos cristales de gamma prima. Sin embargo, cuando las piezas en servicio se exponen a elevadas temperaturas, los pequeños cristales de gamma prima tienden a crecer. Para conseguir ciertas propiedades mecánicas a elevada temperatura y mantenerlas a pesar de su exposición a muchos ciclos de uso, se han ideado complejos tratamientos térmicos. Un procedimiento típico consiste en calentar la aleación a una temperatura relativamente elevada, enfriarla rápidamente y luego envejecerla a baja temperatura, con el fin de conseguir el adecuado tamaño y la oportuna distribución de los cristales de gamma prima.

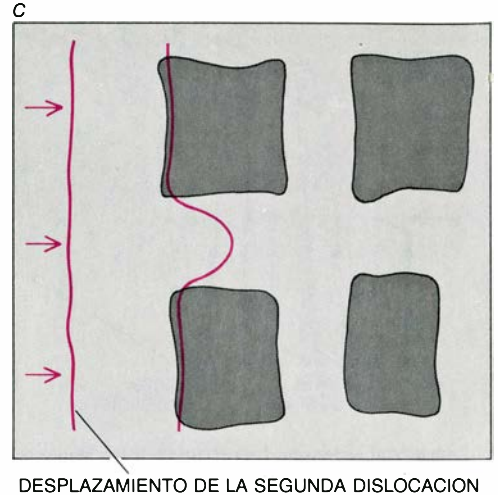
En los últimos años, ha despertado gran interés en metalurgia cierta modificación de las superaleaciones de níquel-aluminio. Desde hace algún tiempo, se sabe que la resistencia mecánica de la fase gamma prima pura de níquel-aluminio crece drásticamente con la temperatura. Durante décadas, este efecto ha intrigado a los investigadores, pero los intentos de sacar partido de esta propiedad se han visto sistemáticamente frustrados por otra propiedad de la fase gamma prima relacionada con su dureza: su extrema fragilidad.

Al hechurar una muestra pura de fase gamma prima de níquel-aluminio, los granos individuales, o cristales, de gamma prima mantienen dura la muestra, pero los granos se separan de sus vecinos por el límite de grano (las fronteras entre granos) y la muestra tiende a pulverizarse. En 1979, Kiyoshi Aoki y Osamu Izumi, de la Universidad de Tohoku, descubrieron que la adición de pequeñas cantidades de boro a la muestra evitaba su desmoronamiento. El boro tiende a unirse a los límites de los granos y facilita el deslizamiento de un grano respecto al vecino sin perder cohesión. El mecanismo exacto de este fenómeno se desconoce y es objeto de activa investigación. Un 0,02 por ciento en peso de boro es capaz de transformar la fase gamma prima del níquel-alumino de frágil en dúctil.

Las superaleaciones de níquel, en particular las que poseen elevada proporción de fase gamma prima, aumentan su resistencia a temperaturas elevadas, consiguiendo la máxima hacia los 850 grados Celsius. La mayoría de las modernas superaleaciones mantie-







3. RESISTENCIA mecánica de las superaleaciones de níquel: radica en la dificultad con que las dislocaciones se desplazan a través de los cristales cúbicos de la fase gamma prima. La dislocación (*color*) se mueve bien por el material desordenado de la fase gamma de la superaleación (*a*). Pero no avanza igual en la fase gamma prima, ordenada; los cristales de la gamma prima anclan las dislocaciones (*b*), dificultando la deformación del metal. Cuando se añade una

nen su resistencia mecánica útil hasta temperaturas del orden de los 1000 grados Celsius. En el compresor de las turbinas a gas de los aviones, los álabes cercanos a la cámara de combustión, donde las presiones y las temperaturas son más elevadas, se construyen con aleaciones de níquel resistentes al calor. Se fabrican también con esta aleación los álabes de la sección de la turbina que se halla más cerca de la cámara de combustión, donde los gases de la combustión están más calientes.

Las superaleaciones de níquel presentan limitaciones a temperaturas muy elevadas; por este motivo, los componentes de la propia cámara de combustión, donde se alcanzan temperaturas del orden de los 1100 grados Celsius, se construyen corrientemente con aleaciones de cobalto. Las aleaciones de cobalto se utilizan también para fabricar los álabes del estátor de las secciones de la turbina más próximas a la cámara de combustión.

Las aleaciones de cobalto no gozan de la resistencia mecánica que disfrutan las superaleaciones de níquel, pero mantienen su resistencia a temperaturas mucho más elevadas. Su resistencia en estas condiciones débese, principalmente, a la distribución de carburos refractarios (combinaciones de metales tales como el tungsteno y el molibdeno con el carbono), que tienden a precipitar en los límites de los granos de la aleación. La mejora de ésta con la red de carburos se mantiene hasta temperaturas próximas a su punto de fusión.

Generalmente, las aleaciones de cobalto, además de llevar metales refractarios y carburos metálicos, contienen niveles elevados de cromo, lo que aumenta la resistencia a la corrosión provocada por la presencia de los calientes gases de combustión. Los átomos de cromo se combinan con los átomos de oxígeno y forman una capa protectora de óxido de cromo, que protege la aleación de los gases corrosivos. Las aleaciones de cobalto son más fáciles de soldar que las superaleaciones, ya que son menos duras; además, las superaleaciones son poco forjables, y pueden romperse bajo esfuerzos térmicos. Por todas esas razones, las aleaciones de cobalto se aplican para fabricar la intrincada estructura de la cámara de combustión, donde los componentes deben ser hechurables y soldables.

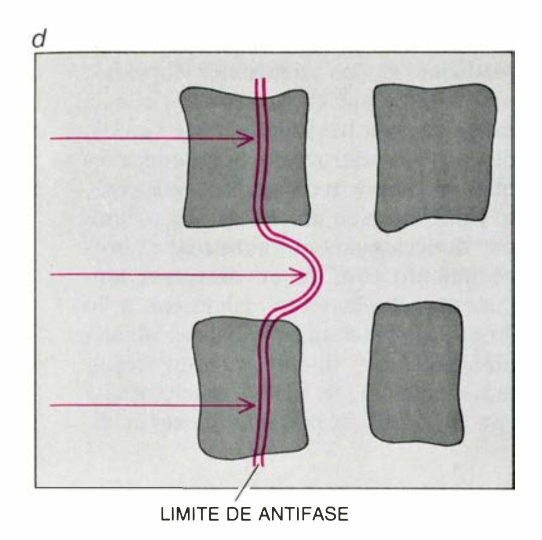
En ciertas aplicaciones, el peso de cada componente importa más que la resistencia mecánica elevada y la consistencia a elevadas temperaturas. Tal es el caso de los álabes y de los discos de las turbinas de los aviones situados en la zona de entrada del compresor, donde la temperatura y la presión son moderadas. Las aleaciones de titanio se han revelado como las más idóneas para esta aplicación.

Las aleaciones de titanio, al igual que las superaleaciones de níquel, constan de dos fases. En el proceso de enfriamiento, solidifican en primer lugar cristales de fase beta; a temperaturas más bajas cristaliza la fase alfa dentro de la matriz de fase beta. Los cristales de la fase alfa presentan dos tipos de morfología. Si la aleación se forma por tratamiento térmico y posterior enfriamiento, los cristales de fase alfa adquieren una forma lenticular. Cuando el material se hechura en caliente y luego se trata térmicamente, los cristales de la fase alfa son más esféricos.

La morfología lenticular es más resistente a la termofluencia (confiriendo a los álabes una mayor capacidad para mantener su longitud inicial cuando giran a gran velocidad durante mucho tiempo) que la morfología esférica, pero resiste peor la fatiga de baja frecuencia. Los investigadores han desarrollado tratamientos capaces de generar, en la misma muestra de una aleación, cristales de fase alfa de ambas formas, ya que la resistencia a la termofluencia y a la fatiga de baja frecuencia son propiedades a tener en cuenta al proyectar componentes rotatorios.

Las aleaciones de titanio tienen mucha menor densidad que las de cobalto y que las superaleaciones de níquel, y, por lo tanto, una mayor relación resistencia a peso para temperaturas inferiores a los 500 grados C. A pesar de los numerosos progresos llevados a cabo en el campo de las técnicas de aleación, de los tratamientos térmicos y de los trabajos mecánicos, la máxima temperatura de trabajo que resisten las aleaciones de titanio es todavía demasiado baja. Las aleaciones de titanio pierden su resistencia mecánica calentándolas a temperaturas absolutas del orden de la mitad de su punto de fusión, mientras que las superaleaciones la mantienen hasta aproximadamente siete u ocho décimos de su temperatura de fusión.

Un intento prometedor para superar la limitación de temperaturas es el ofrecido por determinados materiales intermetálicos de titanio-aluminio: TiAl y Ti_3Al. Estas aleaciones tienen menor densidad, mayor rigidez elástica y mayor capacidad para mantener sus propiedades a temperaturas superiores



segunda dislocación (*c*), ambas se mueven a través de los cristales cúbicos de la fase gamma prima, con un pequeño límite de antifase entre las dos (*d*).

que las aleaciones convencionales de titanio. Se trata de materiales intermetálicos que se han aplicado ya en la obtención de compresores y de los anillos del estátor de las turbinas; un anillo de titanio-aluminio del estátor es casi un 43 por ciento más ligero que un anillo fabricado con una superaleación convencional de níquel.

Tan importantes como las propias aleaciones modernas son las nuevas técnicas de procesado de metales. Las técnicas modernas de procesado posibilitan que la metalurgia saque el máximo provecho de los nuevos conocimientos microestructurales. Estas técnicas modernas permiten hechurar las aleaciones tradicionales de maneras hasta ahora desconocidas, y facilitan la creación de nuevos metales que jamás se hubieran obtenido con las técnicas acostumbradas.

Una de las técnicas modernas más importantes de procesado es la solidificación direccional. El concepto de solidificación direccional se inició con los trabajos realizados, en 1960, por Francis L. VerSnyder y Ray W. Guard, en la General Electric. Con ellos demostraron que la resistencia a la termofluencia de ciertas aleaciones de níquel puede aumentar drásticamente si, en el momento de la obtención de estas aleaciones, se opera de modo que los límites de los granos se orienten paralelamente a un esfuerzo aplicado uniaxialmente, tal como sería el caso de la fuerza centrífuga existente en los álabes de una turbina y debida a la elevada velocidad de rotación. Las muestras ofrecen menor tendencia a deformarse o a agrietarse si los límites de los granos no son perpendiculares al esfuerzo principal. En 1967, Barry J. Piearcey y el propio autor (ambos entonces en la empresa aeronáutica Pratt & Whitney Aircraft) demostraron que la resistencia a la tracción de las superaleaciones de níquel aumentaba cuando no desaparecían los límites de grano –como ocurre en un monocristal– y la muestra se orientaba según la dirección específica de la fuerza aplicada. Estos descubrimientos sirvieron para que Pratt & Whitney desarrollara técnicas para producir álabes de turbinas con notables propiedades.

Un álabe convencional de turbina se fabrica colando el metal fundido dentro de un molde cerámico (que se ha precalentado a una temperatura próxima a la mitad de su punto de fusión) y dejándolo solidificar. El metal líquido empieza a cristalizar en las zonas en contacto con el molde; el resultado final es una fina textura policristalina con pequeños granos individuales orientados al azar.

Sin embargo, en la solidificación direccional, la mayor parte del molde se precalienta a temperaturas próximas al punto de fusión del metal, la sección inferior del molde se rodea con una placa de cobre enfriada con agua: es el "plato frío". El molde se mantiene en una "zona caliente" cubierta por una campana aislante térmica. El metal líquido se cuela en el molde y empieza a solidificar en el plato frío. En este plano refrigerante normalmente se nuclean y crecen muchos cristales. Luego, el molde se hace descender lentamente desde la campana aislante, sacándolo de la zona caliente. Así, los cristales formados en el fondo del molde crecen en largas columnas. El resultado final es un álabe de turbina constituido por varios cristales, largos y columnares, con parecida orientación y unidos entre sí a través de planos verticales. Todos los límites de grano están orientados aproximadamente en la dirección con que los álabes serán tensados por la fuerza centrífuga.

Un procedimiento similar al descrito produce álabes sin límites de grano. Un álabe que sea monocristalino se fabrica colando el metal líquido en un molde que tiene un cuello de botella de forma espiral entre el plato frío y la parte superior del molde. Al sacar el molde de la campana aislante, empiezan a formarse cristales columnares, pero el cuello de botella es tan estrecho que sólo permite que uno de estos cristales lo cruce. Este es el cristal que crece a través del cuello de botella. En la parte superior del cuello, donde el molde se ensancha, el cristal dilata su diámetro, por lo que sólo crece un cristal en el molde; así, el álabe final (que se forma en la parte superior del molde) será monocristalino.

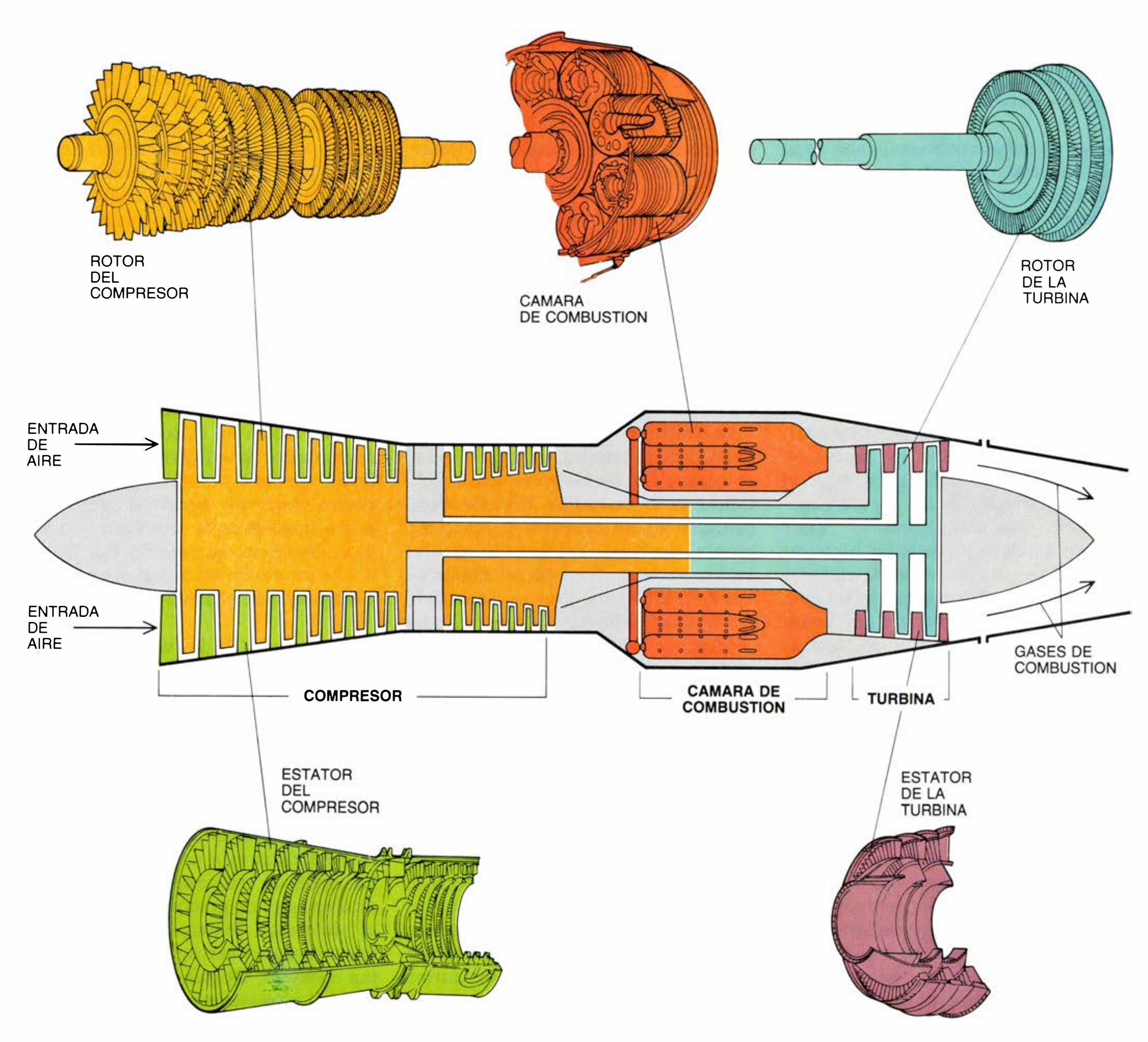
La solidificación direccional, muy útil para moldear álabes de turbinas de superaleaciones de níquel, se aplica, también, a otras aleaciones. En particular, se usa para fabricar un nuevo tipo de material conocido como superaleación eutéctica, que se forma añadiendo a la aleación líquida de níquel y aluminio cierta cantidad de molibdeno y solidificando direccionalmente la mezcla. Una vez solidificada, el molibdeno aparece en forma de filamentos incrustados en una matriz de la superaleación gamma y gamma prima de níquel-aluminio y alineados paralelamente a la dirección de solidificación. Los filamentos de molibdeno actúan reforzando considerablemente el material, de modo parecido a como las fibras de grafito robustecen la matriz epoxi de ciertos materiales calificados de "híbridos" [véase en este mismo número, "Materiales híbridos", por Tsu-Wei Chou, Roy L. McCullough y R. Byron Pipes]. La diferencia más notable entre "híbridos" eutécticos y convencionales es que las fibras de los eutécticos tienen un diámetro inferior al micrometro (una millonésima de metro) y aparecen separadas por unos pocos micrometros. Estas características serían imposibles de conseguir con los procedimientos acostumbrados, basados en introducir las fibras en un molde y luego agregar el material de la matriz.

A principios de los años sesenta, se descubrió también otra nueva técnica de fabricación de piezas metálicas: el hechurado superplástico. Ciertos metales son susceptibles de experimentar deformaciones de su longitud inicial del orden del mil por ciento sin romperse, después de haber conseguido afinar el tamaño de grano hasta dimensiones inferiores a cinco micrometros. La razón de este comportamiento radica en que los granos muy pequeños se deforman lentamente y deslizan unos respecto a otros sin perder su mutua cohesión. Debido a su notable capacidad para deformarse, los materiales superplásticos se pueden forjar en formas complejas, eliminando muchas etapas de mecanización y de acabado.

En 1963, Joseph B. Moore y Roy L. Athey, de Pratt & Whitney, descubrieron que ciertas superaleaciones de níquel con grano muy pequeño podían

hechurarse gracias a su superplasticidad. El pequeño tamaño de grano necesario se consigue deformando vigorosamente el material a una temperatura por debajo mismo de la que permite la cristalización de la fase gamma prima. Es fundamental la presencia de partículas de gamma prima para evitar la recristalización de la matriz de fase gamma y, por tanto, el crecimiento de los granos. Una vez se ha llevado el material a la condición superplástica es posible hechurarlo, como si fuera una masilla, en la forma prevista. Después, las piezas hechuradas se tratan térmicamente, se enfrían en seguida y se envejecen, para conseguir una microestructura más resistente y estable a elevada temperatura que la ofrecida por granos pequeños de la estructura superplástica.

Los materiales hechurados superplásticamente son menos costosos de mecanizar y, cuando se obtienen a partir de finos polvos prealeados, exhiben una notable uniformidad química y microestructural. Esta característica repercute en el logro de mejores propiedades en las aleaciones forjadas, particularmente en la resistencia a la fatiga de baja frecuencia. Otra ventaja de tal microestructura homogénea es que, mediante recocido de gradiente, se transforma en una estructura columnar direccionalmente alineada; el procedimiento consiste en desplazar lentamente el elemento calefactor a lo largo de la muestra en una determinada dirección. La microestructura resultante muestra un parecido superficial con la obtenida por solidificación di-



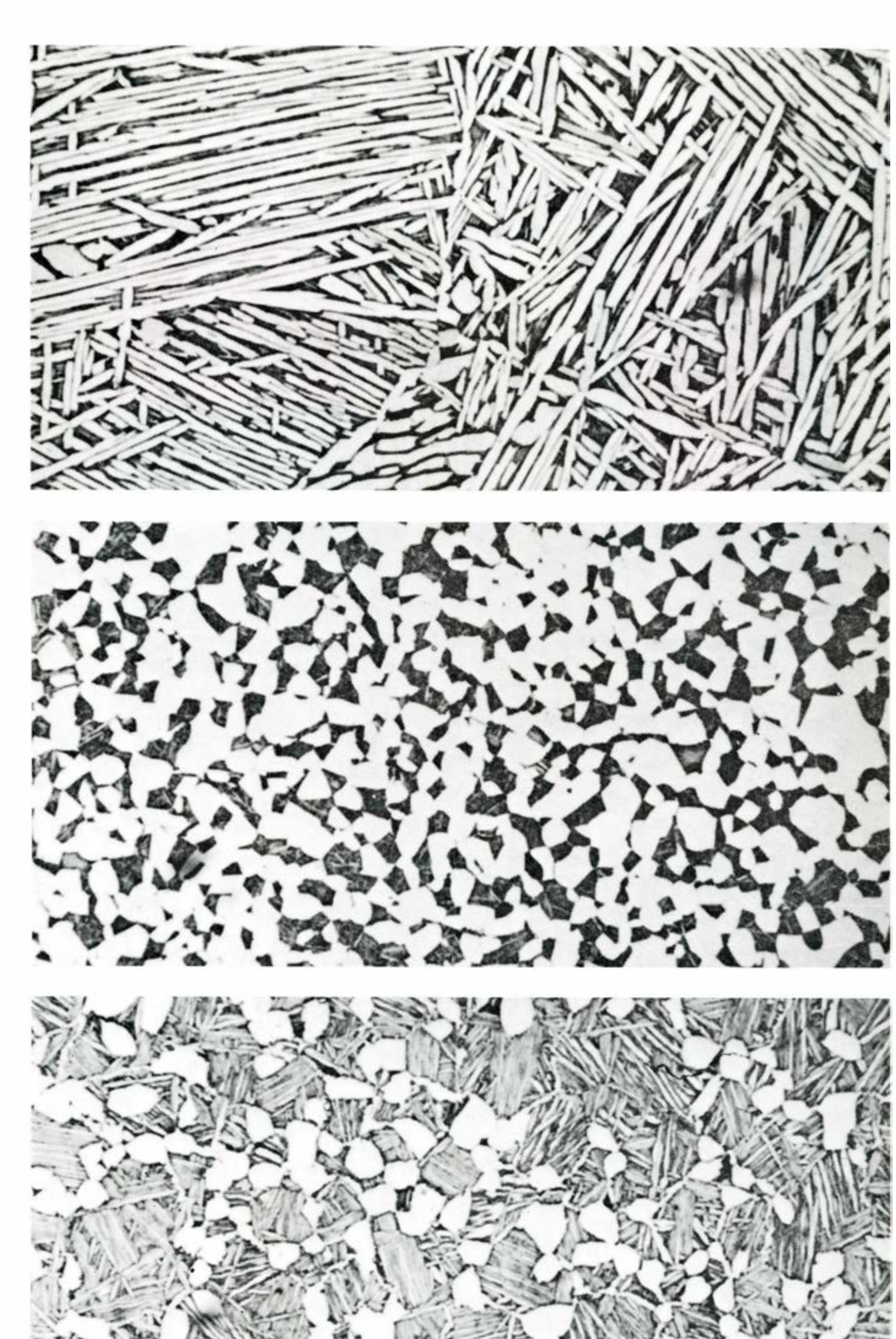
4. TURBORREACTOR DE AVION: constituye la aplicación principal de los nuevos metales. El ingenio expone sus componentes metálicos a casi todos los tipos posibles de condiciones extremas: elevada temperatura, fuerza centrífuga, vibraciones y fatiga de baja frecuencia (un esfuerzo impuesto por ciclos repetidos de arranque, aceleración, frenado y parada). En el compresor, hay una serie de discos giratorios provistos de álabes que succionan aire hacia el interior del aparato, aumentando su presión y su temperatura; los álabes estacionarios tornan a dirigir el aire entre los del rotor. En la cámara de combustión, el aire se mezcla con el combustible y el conjunto entra en ignición. Los gases de la combustión se expanden y atraviesan la turbina (construcción parecida al compresor), provocando su rotación. La turbina está conectada al eje que pivota el compresor. Los gases de la combustión salen del aparato a gran velocidad; la diferencia entre la velocidad de entrada del aire y la de los gases de la combustión arrastran al aparato hacia delante. (Los dibujos han sido realizados por Hank Iken.)

reccional, pero tiene un grano más pequeño, es más homogénea y puede recristalizar en una amplia variedad de texturas.

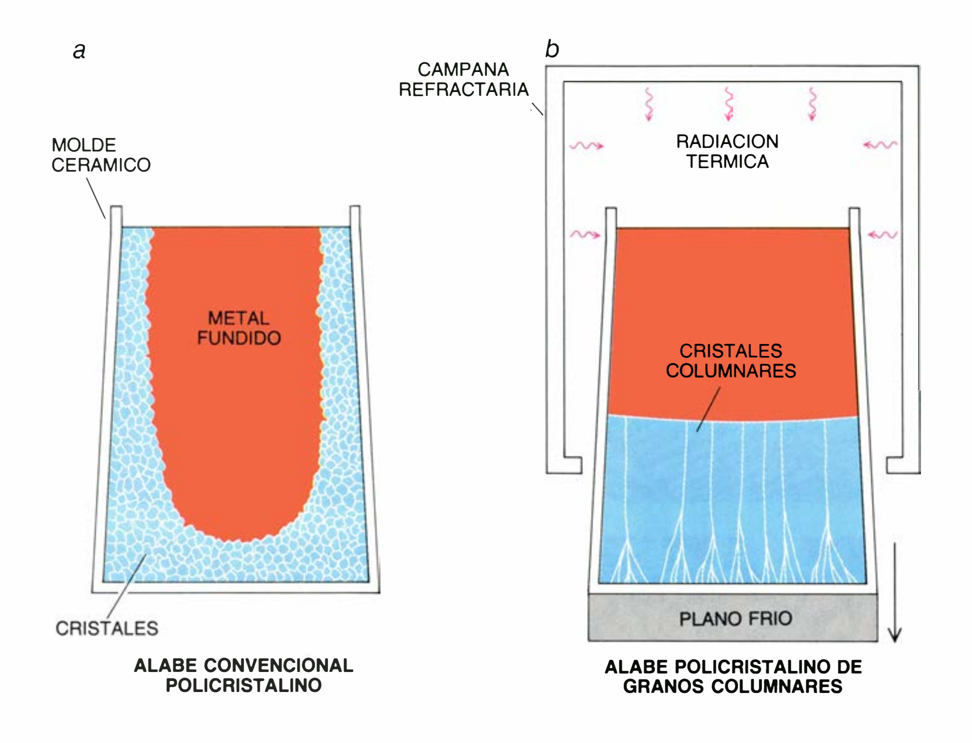
Los polvos prealeados pueden moldearse también por el procedimiento conocido por compactación isostática en caliente. Primero, se empaquetan en un molde variable de paredes delgadas, que es una versión geométrica aumentada de la forma final prevista. Después, el molde se coloca en un horno de vacío a elevada temperatura, para eliminar las moléculas absorbidas de gas; luego, se sella el molde y se introduce en una prensa especial. Aquí, el molde se expone a elevadas presiones y temperaturas, reduciendo sus dimensiones y soldando los polvos entre sí (sinterización). Finalmente, se arranca el molde y el metal hechurado se mecaniza en su forma final.

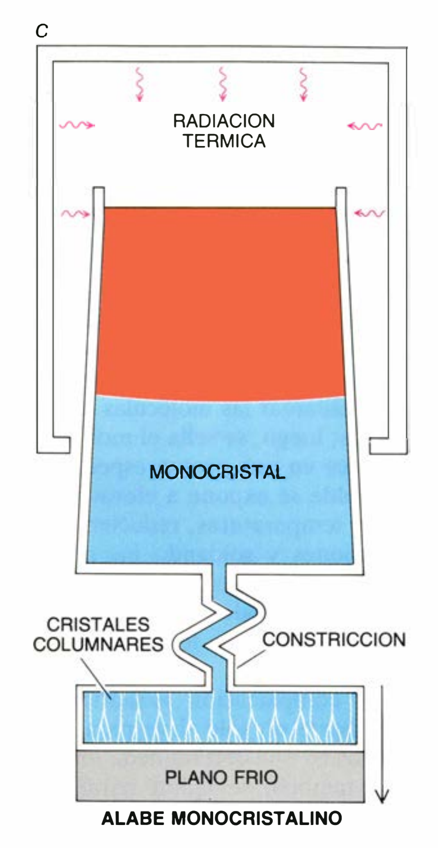
La compactación isostática en caliente no sólo sirve para hechurar polvos en una determinada forma, sino que también se aplica para subsanar defectos en piezas premoldeadas y para rejuvenecer álabes del estátor y del rotor, así como otros componentes desgastados por el uso. Los álabes del estátor y del rotor que, tras muchas horas de funcionamiento, muestran microporos en los límites de los granos, se rejuvenecen por compactación en caliente, ya que de este modo el metal se suelda por presión cerrando los microporos. La compactación isostática en caliente permite también construir un componente a partir de secciones de distintas aleaciones. Por ejemplo, se puede fabricar un disco de turbina por compresión isostática de dos tipos de polvos aleados; los polvos utilizados para construir los bordes exteriores deben ser de una aleación muy resistente a la termofluencia, mientras que los utilizados para obtener las zonas próximas al eje podrían ser de una aleación susceptible de aguantar las mayores cargas.

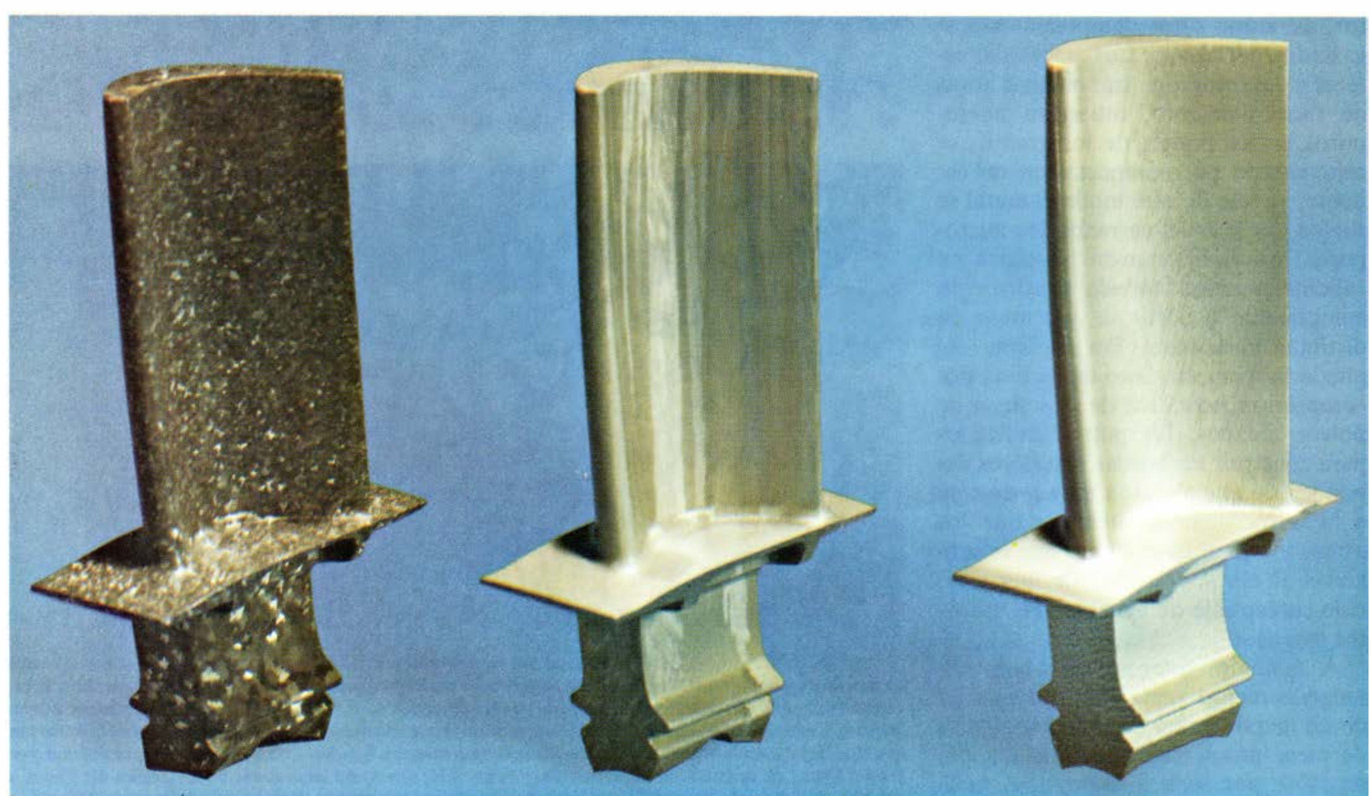
A menudo, interesa distribuir homogéneamente pequeños porcentajes de un metal dentro de otro. La técnica de alear mecánicamente, introducida, en 1970, por John S. Benjamin, de la International Nickel, se ha convertido en un eficaz procedimiento para conseguir este tipo de mezcla. Los materiales a alear se introducen, en forma de pequeñas partículas, en un molino de bolas de gran velocidad, que consiste esencialmente en un conjunto de agitadores y un gran número de pequeñas bolas de acero inoxidable. Los agitadores giran rápidamente, propiciando colisiones de las bolas entre sí y con las pequeñas partículas metálicas. De este modo, las partículas se sueldan en frío entre sí, formando aglomerados metálicos de mayores dimensiones, que posteriores colisiones con las bolas vuelven a desmoronar y a soldar repetidamente. El resultado final es un polvo de partículas muy pequeñas y homogéneas. A continuación, este polvo se compacta y se sinteriza por extrusión en caliente; finalmente, se hechura y se recristaliza direccionalmente.



5. ALEACIONES DE TITANIO. Al igual que las superaleaciones de níquel, están formadas por cristales de una fase (*clara*) incrustados dentro de la matriz de otra fase (*oscura*). Las dos fases se llaman alfa y beta, respectivamente. Los cristales de la fase alfa pueden presentarse en dos formas: lenticular (*arriba*) y esférica (*centro*). Cada morfología tiene propiedades particulares; se han desarrollado procedimientos de fabricación que dan lugar a ambos tipos de cristales en la misma muestra (*abajo*). Estas micrografías, realizadas por Daniel Eylon, de la Universidad de Dayton, y Francis H. Froes, del laboratorio de materiales del Ejército del Aire en la base de Wright-Patterson, corresponden a muestras de titanio aumentadas unas 600 veces.







6. LA SOLIDIFICACION DIRECCIONAL produce álabes de turbina resistentes a la termofluencia, paulatina elongación del álabe debida a la fuerza centrífuga. En el moldeo habitual (*a*), el metal fundido se cuela en un molde cerámico y se deja enfriar. El metal cristaliza simultáneamente en muchas zonas, y el resultado final es un álabe policristalino con los cristales orientados al azar. En la solidificación direccional (*b*), el molde se precalienta y se mantiene dentro de una campana de paredes refractarias. La parte inferior del molde está en contacto con una base de cobre refrigerada con agua. El metal fundido se vierte en el molde y éste se retira lentamente de la campana. Los primeros cristales se nuclean cerca de la base refrigerada; luego, crecen formando grandes columnas. Así, los límites de los granos de los álabes resultan paralelos a la fuerza centrífuga que obra sobre ellos al estar en servicio, con lo que dicha fuerza no rompe su cohesión; por tanto, los álabes resisten la termofluencia y no se fisuran al girar. Los álabes aumentan su resistencia si desaparecen los límites de grano y se convierten en monocristales (*c*), lo que se logra aplicando el mismo procedimiento de solidificación, pero diseñando un cuello de botella helicoidal en el molde. Cuando el molde abandona la campana refractaria, los cristales columnares empiezan a crecer pero sólo uno cruzará el cuello de botella. Este cristal crece ocupando la parte superior del molde y se obtiene un álabe monocristalino. Se ofrecen los granos de la microestructura de los tres tipos de álabes.

Una aplicación típica de la aleación mecánica es la dispersión de pequeñas partículas de óxido en una matriz de aleación de níquel o de cobalto. Las partículas de óxido anclan las dislocaciones, como lo hacían los cristales de gamma prima en una superaleación de níquel, endureciendo el material pero sin fragilizarlo. Al contrario que los cristales de gamma prima en las superaleaciones, las partículas de óxido no crecen por calentamiento y, por tanto, las aleaciones endurecidas por dispersión de óxidos son más resistentes a elevada temperatura que las aleaciones endurecidas por pequeños cristales dentro de una matriz.

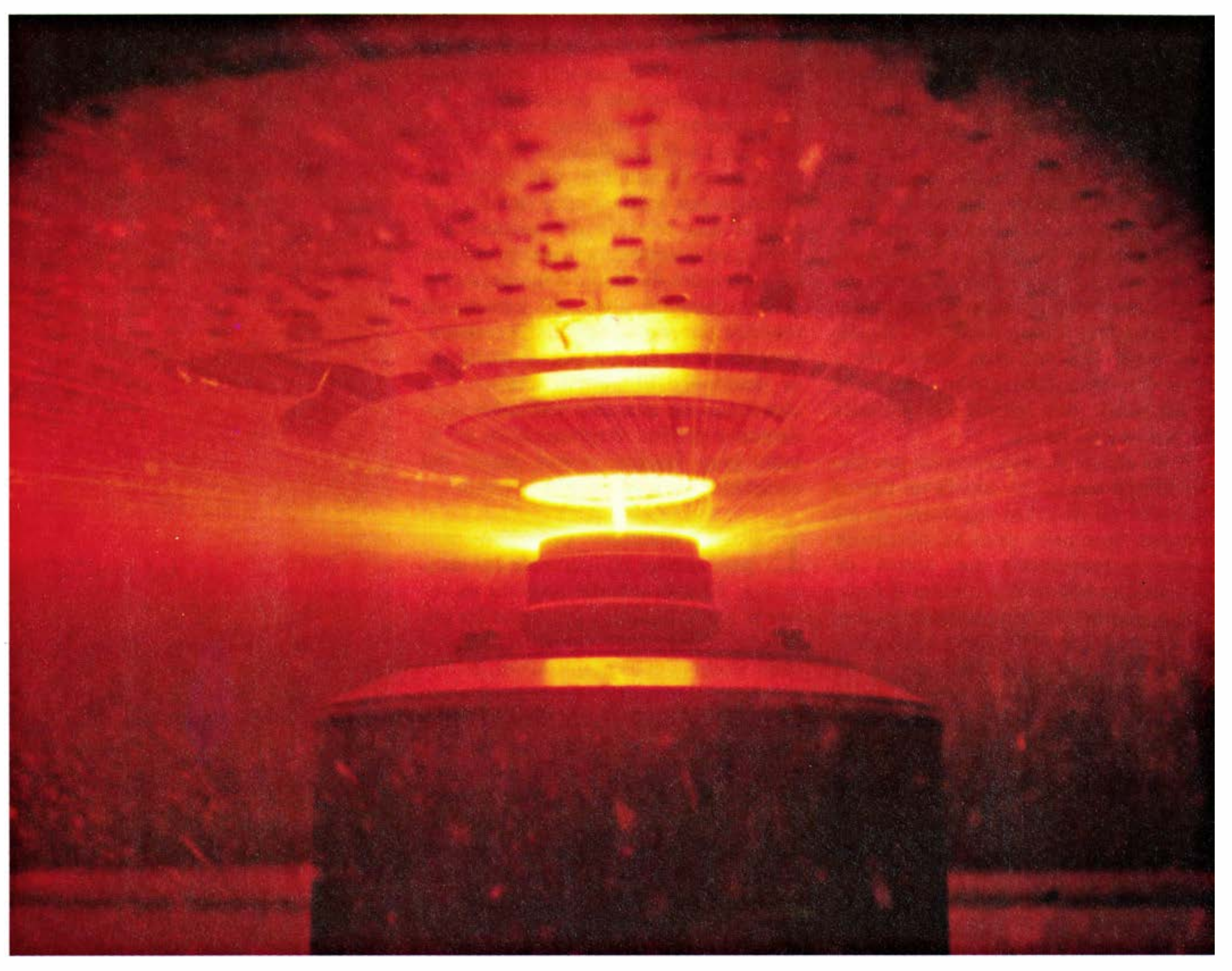
A las aleaciones endurecidas por dispersión de óxidos les espera un futuro brillante. El progreso registrado en las técnicas necesarias para su obtención continúa reduciendo los costes de fabricación, mientras posibilita la creación de materiales con propiedades mecánicas mejores y más fiables. Las aleaciones endurecidas por dispersión de óxidos encuentran aplicaciones en la fabricación de la cámara de combustión y de los álabes del estátor de las turbinas a gas.

Quizá la técnica de fabricación que ha despertado recientemente mayor interés es la solidificación rápida; gracias a la cual los metales fundidos se enfrían a velocidades de hasta un millón de grados por segundo. Las aleaciones enfriadas rápidamente tienden a ser bastante homogéneas, pues los cristales no disponen de tiempo suficiente para nuclear y crecer. Frecuentemente, los materiales que tienen microestructura homogénea presentan resistencia mecánica y puntos de fusión altos de salida. Los cristales de la segunda fase (tales como los de la gamma prima), que precipitan en el seno de la matriz, son pequeños, están homogéneamente distribuidos y aumentan la resistencia de la aleación porque obstaculizan el desplazamiento de las dislocaciones. Estos cristales frenan también el desplazamiento de los límites de los granos de la propia aleación, impidiendo el crecimiento de los granos en las aplicaciones a elevada temperatura. Además, la solidificación rápida puede dar lugar a fases metaestables: fases cristalinas o casi cristalinas dotadas de cierta estabilidad, aunque menor que la de las fases de las aleaciones obtenidas por enfriamiento lento. Las fases metaestables ofrecen interesantes propiedades que empiezan a explorarse con detenimiento.

Varios grupos de investigadores industriales han realizado estudios sistemáticos de las aplicaciones de las aleaciones rápidamente solidificadas. En este sentido, la empresa Allied Corporation ha desarrollado un nuevo tipo de aleación de aluminio muy resistente, obtenida por enfriamiento rápido, que guarda una relación de resistencia a peso igual o superior a la que presentan las aleaciones de titanio a temperaturas moderadamente altas. Se caracteriza también por su extraordinaria resistencia a la corrosión, aunque de momento se desconoce el motivo exacto. Las aleaciones de aluminio enfriadas rápidamente pueden desplazar a las de titanio para fabricar ciertas partes del compresor de las turbinas de avión.

Existen diversos procedimientos para enfriar rápidamente las aleaciones. El más sencillo consiste en rociar el metal líquido y proyectar las gotas contra una superficie fría. Otro procedimiento es el de atomización, en virtud del cual se enfrían las pequeñas gotas del metal líquido rociándolas en una atmósfera de gas inerte extremadamente frío. La empresa Pratt & Whitney ha desarrollado un sistema propio: dejar caer un delgado chorro de metal fundido sobre un disco que gira a gran velocidad, el cual transforma el chorro en gotitas y las proyecta a través de una atmósfera fría. Este procedimiento produce polvos pequeños de aleación enfriada rápidamente, que se pueden consolidar por extrusión en caliente para obtener un producto homogéneo. General Electric combina la fusión, la compactación y el hechurado en un solo proceso; en él, mediante una llama de plasma, la aleación enfriada rápidamente se aplica a modo de delgada capa sobre la superficie de un componente preexistente. Así se crea un recubrimiento ideal para los componentes de la cámara de combustión de la turbina, puesto que la aleación depositada opone resistencia a la fatiga térmica.

Una de las técnicas más versátiles de enfriamiento rápido utiliza láseres con elevada densidad de potencia. El haz láser se proyecta rápidamente sobre la superficie del material, formando finas capas de material fundido. Estas capas delgadas se enfrían merced a la masa del sólido que no ha sido afectada por el láser. Por medio de esta técnica se consiguen velocidades de enfriamiento que alcanzan los 10 millones de grados por segundo. La ventaja del procedimiento, denominado vitrificado con lá-



7. ATOMIZACION POR CENTRIFUGACION: es una de las técnicas utilizadas para producir muestras de metales enfriados rápidamente. En este procedimiento, desarrollado por la empresa aeronáutica Pratt & Whitney Aircraft, se vierte un chorro de metal fundido sobre un disco giratorio, donde se divide en gotas que salen eyectadas por la fuerza centrífuga. Un chorro muy frío de gas inerte se inyecta a través de los agujeros del disco, enfriando rápidamente las gotas, las cuales se solidifican y forman un polvo muy fino y homogéneo. Los metales solidificados así presentan propiedades potenciales muy útiles.

ser, estriba en que se modifica la microestructura superficial de un material sin afectar al substrato subyacente. Es posible añadir capas de mayor espesor de material enfriado rápidamente de manera gradual depositando de forma continua polvos aleados y aplicando láser con celeridad y en vaivén. Si el control del láser es suficientemente versátil, se obtienen capas de formas muy complejas. La aplicación potencial del vitrificado por láser incluye el endurecimiento de los extremos de los álabes de las turbinas y la construcción de los filos de las partes giratorias.

La técnica de los recubrimientos y de la unión de metales ha conocido también varios avances. Los recubrimientos, de especial importancia, permiten usar un metal con las propiedades mecánicas precisas, aunque no resista los ambientes corrosivos. Con las nuevas técnicas de unión se producen componentes formados por soldadura dura de muchas capas delgadas unidas. Una aplicación de esta técnica es la fabricación de álabes de turbinas refrigeradas por aire, provistos de pequeños canales por donde éste pasa. Tales álabes se fabrican en series de segmentos delgados, taladrando la sección del canal por fotoataque. Los segmentos delgados se ensamblan y se unen por difusión en estado sólido o por soldadura dura, situando entre dos segmentos normales una fina película de parecida composición, pero con punto de fusión ligeramente inferior. Los segmentos se compactan entre sí en vacío y a elevada temperatura; el material de enlace se difunde por las superficies en contacto, uniéndolas.

Los beneficios derivados de los metales modernos y de las nuevas técnicas de fabricación no se limitan a las turbinas de gas. Han influido de manera vigorosa en muchos otros sistemas en desarrollo. En ese sentido, las superaleaciones se revelan adecuadas en sistemas destinados a convertir y generar energía, pues poseen gran resistencia mecánica a elevada temperatura y en medios agresivos. Procedimientos modernos, tales como el hechurado superplástico, se aplican en campos tan dispares como la industria luminotécnica y la fabricación de intrincadas estructuras en forma de panal de gran resistencia y rigidez, de uso aerodinámico. Aleaciones especiales, utilizadas en dispositivos quirúrgicos, se han obtenido por compactación isostática en caliente. A medida que los costes de procesado continúen disminuyendo, irán abriéndose nuevas áreas de aplicación. Los propios sectores industriales de la economía más generales, como es el caso del transporte, acabarán beneficiándose de la investigación de nuevas aleaciones de metales y de nuevos procedimientos.



Nuevas cerámicas

Estos materiales no metálicos ni poliméricos son duros, resisten el calor y el ataque químico y adquieren propiedades eléctricas especiales. La investigación busca ahora la solución de su principal defecto: la tendencia que muestran a romperse

H. Kent Bowen

Durante miles de años, la arcilla, la primera cerámica procesada, ha sido la materia prima fundamental para la alfarería, los ladrillos y las tejas. Es, por tanto, comprensible que estos productos comunes vengan a la mente cuando se habla de cerámica.

Los científicos de materiales, por su parte, suelen definirla afirmando que se trata de un material sólido que no es metal ni polímero (aunque pueda contener elementos metálicos o poliméricos como constituyentes o aditivos). Las cerámicas pueden fabricarse a partir de una amplia gama de materias primas distintas de la arcilla (algunas de las cuales no se encuentran en la naturaleza) y se presentan en una morfología plural: vidrios, vitro-cristales, cristales monolíticos, conglomerados de cristales pequeños y combinaciones de dichas formas. Sirven como abrasivos y herramientas de corte, como protectores del calor y aislantes eléctricos, como combustible nuclear y para implantación de huesos artificiales. Las diversas aplicaciones de los materiales cerámicos los convierte en algo corriente e indispensable, al propio tiempo, en la sociedad moderna.

En todas sus aplicaciones, los materiales cerámicos se valoran principalmente por su capacidad de resistir el calor y el ataque químico. Estas virtudes se deben a los fuertes enlaces que mantienen a los átomos constituyentes en sus posiciones de equilibrio. La naturaleza de esos enlaces añade también un inconveniente crítico: la fragilidad. Un material frágil no se deforma bajo carga y, sin embargo, como puede atestiguar cualquiera que haya dejado caer una pieza de loza, la cerámica propende a romperse en añicos. Esta desafortunada propiedad hace que la cerámica sea particularmente sensible a mínimas imperfecciones en su microestructura, las cuales sirven de puntos de iniciación de grietas. Por consiguiente, se han dedicado muchos esfuerzos de la investigación cerámica a desarrollar nuevos procesos que minimicen estos defectos microscópicos; y se ha insistido en el diseño de nuevas composiciones y microestructuras que eviten el crecimiento de grietas.

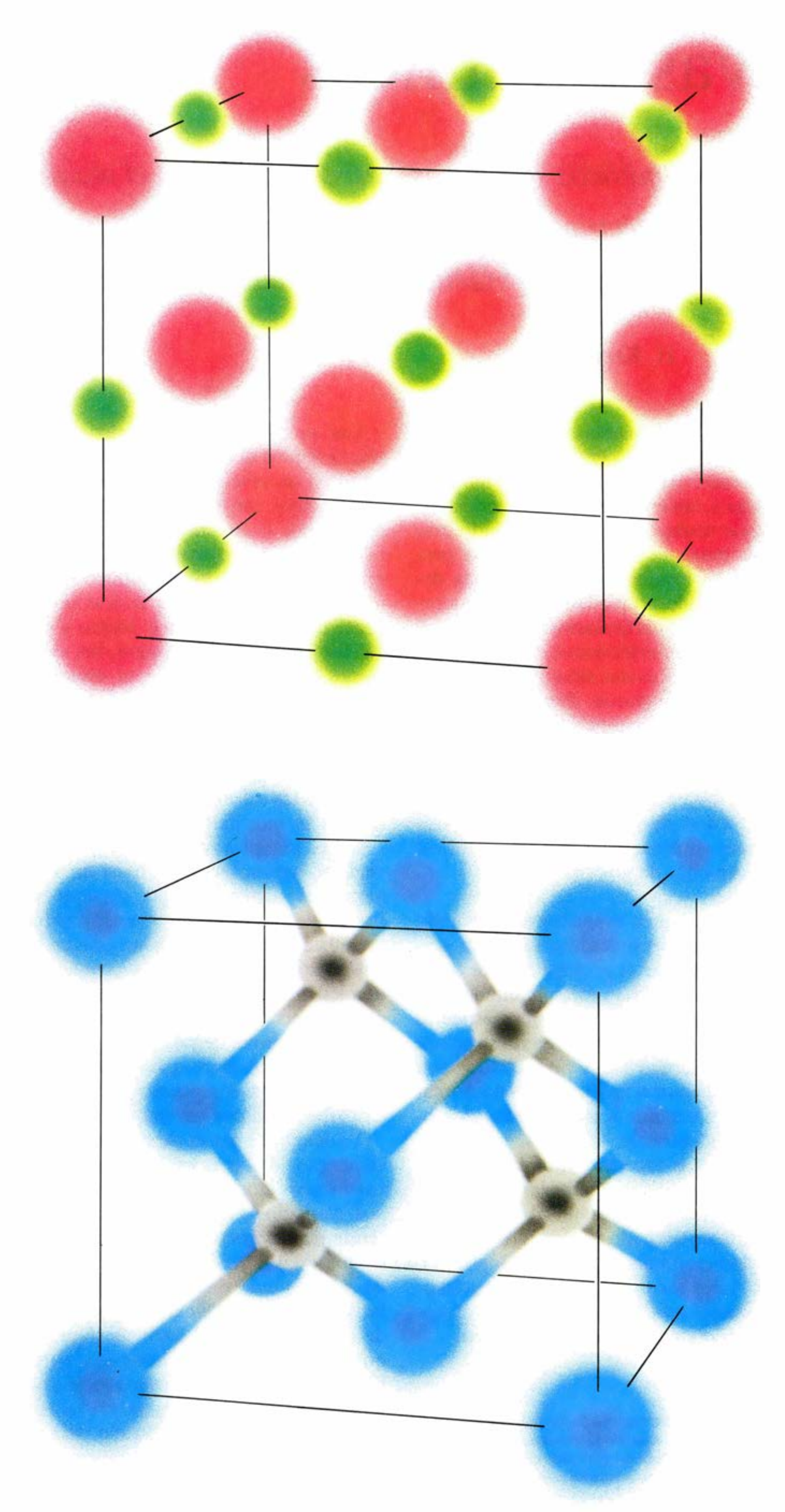
Los recientes avances en el dominio de las cerámicas no sólo han permitido mitigar el problema de la fragilidad, sino que han proporcionado también un mayor control sobre aspectos de la composición y la microestructura que gobiernan otras propiedades físicas. Tal control facilita el diseño de materiales cerámicos que satisfagan exigencias químicas, térmicas, mecánicas y eléctricas específicas, de las que ningún otro material puede dar cuenta. De hecho, los nuevos materiales cerámicos han desempeñado un papel decisivo en el desarrollo de nuevas tecnologías, tales como los ordenadores y las telecomunicaciones, y continuarán protagonizando las tecnologías del futuro.

1. DOS TIPOS DE GRANOS o cristales pequeños aparecen en esta micrografía de luz polarizada de una muestra (a unos 400 aumentos) de un material vitrocerámico producido a partir de escorias, los desechos de la fundición de metales. Se han formado granos columnares en la superficie del material, creciendo hacia el interior, donde encuentran granos plumosos. Los materiales vitrocerámicos constituyen un nuevo tipo de material cerámico que combina el cómodo procesamiento inherente a los materiales cerámicos no cristalinos, o vidrios, con la durabilidad y resistencia al calor de los materiales cerámicos cristalinos. Los objetos vitrocerámicos se obtienen fundiendo las materias primas en un vidrio viscoso, dando forma al objeto cuando el material es maleable y provocando la aparición de granos en el material conformado. La cristalización en un objeto vitrocerámico se intensifica con la inclusión de agentes nucleantes en el fundido y mediante tratamiento térmico. La vitrocerámica de la micografía, compuesta de sílice, o dióxido de silicio (SiO_2), óxido de calcio (CaO) y otros óxidos metálicos, puede encontrar una aplicación práctica en teselas resistentes al desgaste. La micrografía fue realizada por Rosalia N. Andrews y Martha R. Fletcher, de Birmingham.

Las propiedades características de una cerámica derivan de su estructura, tanto en un nivel atómico como a una escala cuyo rango está comprendido desde unos pocos micrometros (millonésimas de metro) hasta unos cuantos milímetros. En el nivel atómico hallamos, por lo que a las cerámicas se refiere, dos tipos de enlace: iónico y covalente. En el enlace iónico, los electrones se transfieren de un átomo a otro vecino. El átomo que cede los electrones adquiere carga positiva, mientras que el átomo que los recibe se carga negativamente. Las cargas iónicas opuestas así creadas mantienen unidos los átomos del material.

En el enlace covalente, los átomos vecinos comparten electrones de manera más o menos igual. Aunque la fuerza electrostática de atracción entre átomos adyacentes es menor que en el enlace iónico, los enlaces covalentes tienden a mostrar una fuerte componente direccional, lo que significa que resisten el movimiento de los átomos. El material más duro que se conoce, el diamante, está compuesto por átomos de carbono unidos covalentemente.

Ya sean los enlaces de carácter esencialmente iónico o esencialmente covalente, los átomos se disponen en grupos, llamados celdillas unidad, que se repiten de manera periódica a través del material. Esta disposición ordenada de celdillas unitarias constituye un cristal. Si no hay periodicidad alguna fuera de la celdilla unidad local, el material no es cristalino. En muchos casos, combinaciones iguales de átomos producen una estructura cristalina o no cristalina, según los átomos hayan tenido tiempo o no, durante el proceso de formación, para disponerse de manera periódica. Por ejemplo, si la sílice o dióxido de silicio (SiO_2) se funde y se deja enfriar lentamente y de forma controlada, las moléculas de sílice se alojan en una red que presenta un orden de largo alcance, produciendo cristales de cristo-



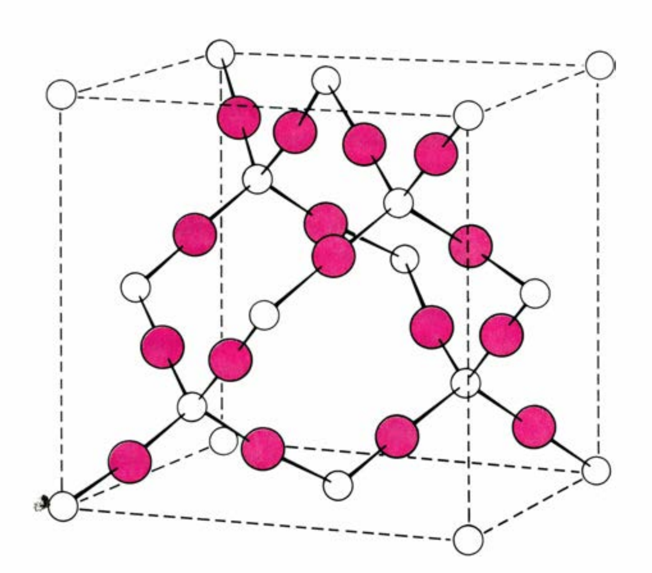
2. ENLACE EN UNA CERAMICA: puede ser iónico (*arriba*) o covalente (*abajo*). En el enlace iónico, los electrones se transfieren de un átomo a otro vecino. El donante se carga positivamente; el aceptor, negativamente. La fuerza electrostática entre los átomos los mantiene en sus posiciones. En el enlace covalente, los electrones están compartidos de manera más o menos equilibrada por átomos vecinos. A diferencia del enlace iónico, el enlace covalente (representado aquí por conexiones visibles entre los átomos) tiende a ser direccional y a oponerse al deslizamiento entre planos de átomos. Los diagramas representan casos idealizados. Un material cerámico real viene a ser un híbrido de los dos tipos de enlace entre sus átomos.

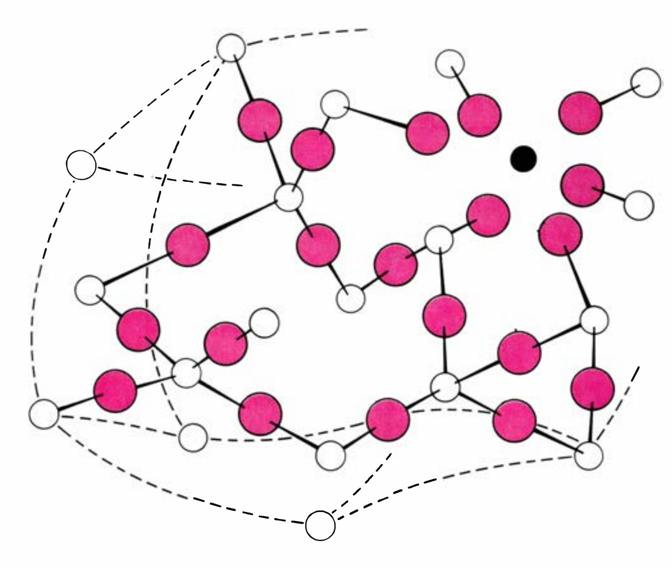
balita (variedad de cuarzo). Por otro lado, si la sílice fundida se enfría rápidamente, las moléculas carecen de tiempo suficiente para construir una red cristalina y están "congeladas" en una disposición irregular, dando lugar a una sustancia no cristalina: el vidrio de sílice.

Es en este nivel atómico fundamental donde puede distinguirse la cerámica de otros materiales. Mientras que los materiales cerámicos suelen ofrecer fuertes enlaces híbridos iónico-covalentes que limitan el movimiento electrónico, los átomos de los metales forman estructuras reticulares a través de las cuales los electrones más externos de los átomos pueden moverse libremente. Las sustancias orgánicas se componen de moléculas basadas en átomos de carbono e hidrógeno; estas moléculas tienden a formar polímeros, o largas cadenas, en vez de estructuras cristalinas tridimensionales.

La diversidad de estructuras atómicas (hay catorce clases de celdillas unitarias) y la posibilidad de substituciones generales de un elemento por otro en la estructura permiten una variedad de materiales cerámicos aparentemente infinita, con un amplio rango de propiedades. Un ejemplo típico es el del óxido de aluminio. Si se entremezclan átomos de cromo en cristales monolíticos de óxido de aluminio, se obtienen cristales de rubí que median la producción de radiación láser. Entremezclar átomos de titanio en cristales de óxido de aluminio similares produce zafiros. Las formas policristalinas (formadas de numerosos cristalitos, llamados granos) del óxido de aluminio pueden ser lo bastante transparentes como para fabricar ventanas que aguanten altas presiones y temperaturas. En forma de granos sueltos, la misma cerámica es corindón, un fuerte abrasivo; bajo forma de finas partículas en una matriz de vidrio de sílice, constituye la materia prima de aisladores eléctricos y de ladrillos refractarios (resistentes al calor).

La estructura atómica de los materiales cerámicos dótales de una estabilidad química que se manifiesta a través de la impermeabilidad a la degradación ambiental, como la disolución en disolventes. A pesar de que muchos materiales cerámicos estén compuestos de óxidos metálicos, resulta con frecuencia imposible una ulterior oxidación (por combustión o por otra reacción química). De hecho, un material cerámico de óxido metálico ha sido ya "quemado" o "corroído", de suerte

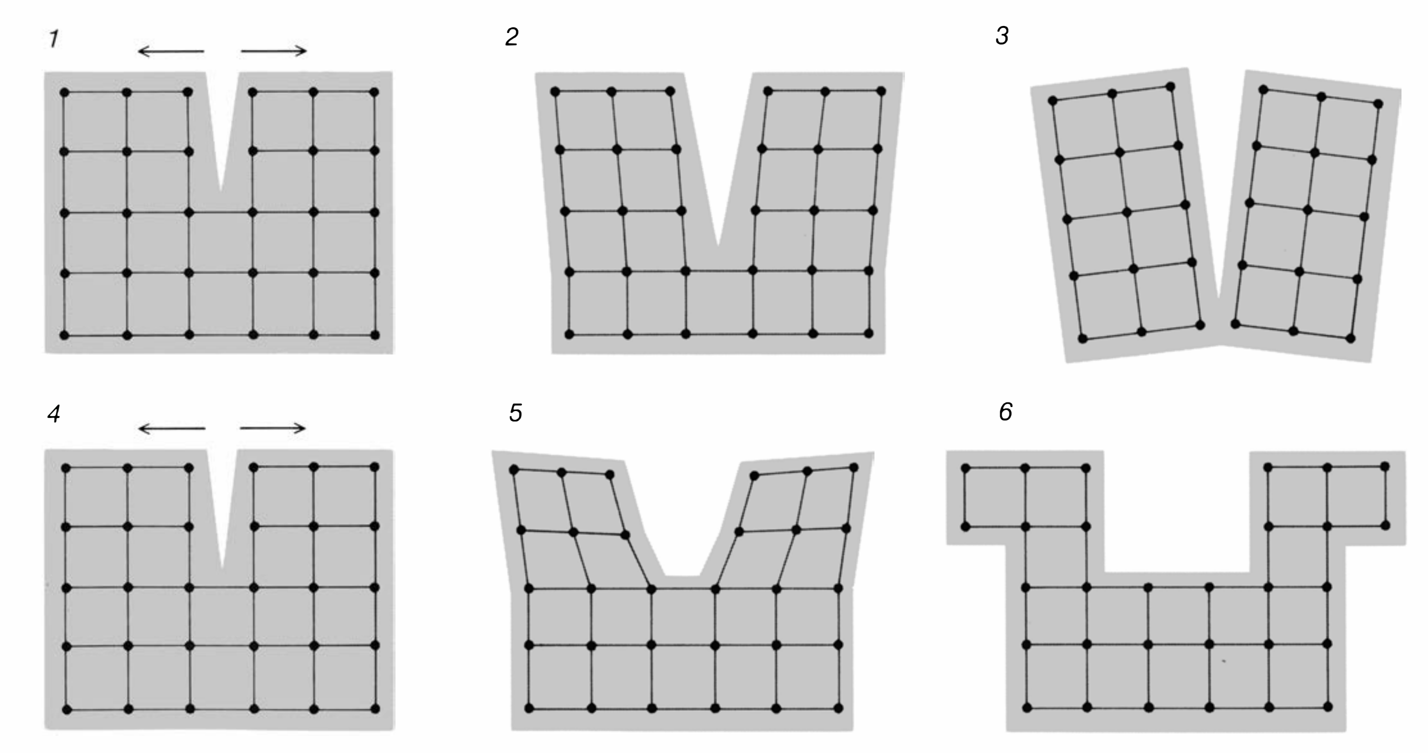




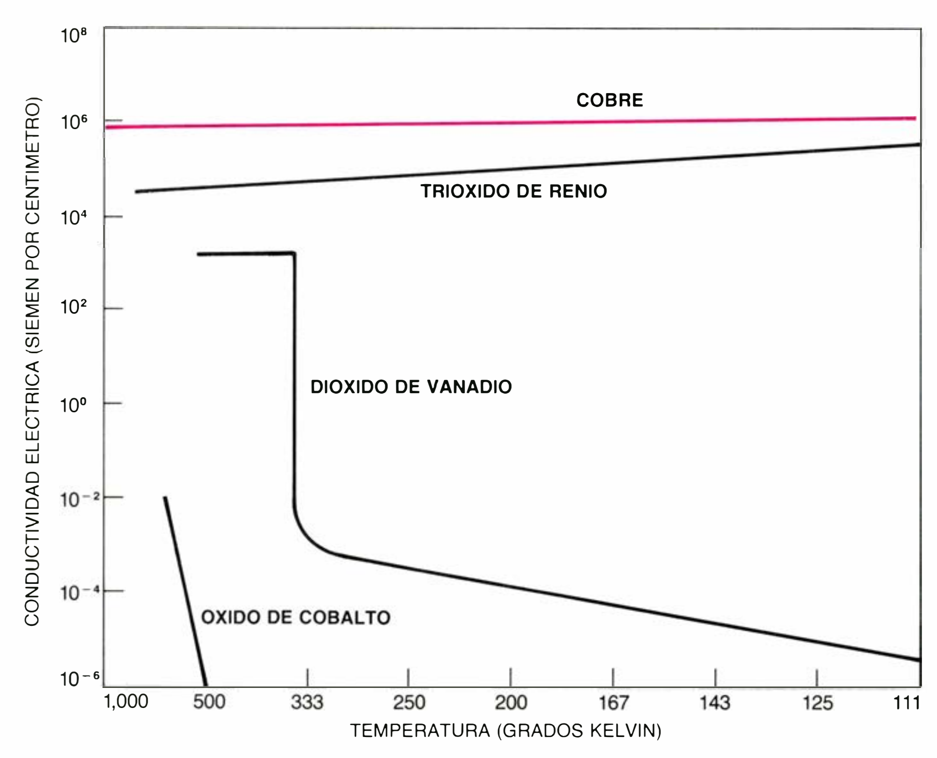
3. **CERAMICAS CRISTALINAS Y VITREAS pueden fabricarse a partir de las mismas combinaciones de elementos. La diferencia entre ambos materiales se debe al ordenamiento tridimensional de sus átomos. Un cristal de sílice (*izquierda*) se forma a partir de un modelo fundamental de átomos de silicio (*blanco*) y oxígeno (*rojo*) que se repite periódicamente a través del material. El vidrio de sílice (*derecha*), por otra parte, no muestra una periodicidad de largo alcance en su estructura atómica. Las impurezas (*negro*) del vidrio distorsionan la estructura cortando enlaces entre átomos de silicio y oxígeno. Un cristal se forma a partir de sílice fundida si el líquido se enfría gradualmente, permitiendo que los átomos dispongan de suficiente tiempo para situarse en la estructura.**

que el objeto cerámico final no puede ser sometido posteriormente a otra degradación de ésas. La fuerza de los enlaces en los materiales cerámicos les confiere también un alto punto de fusión, dureza y rigidez.

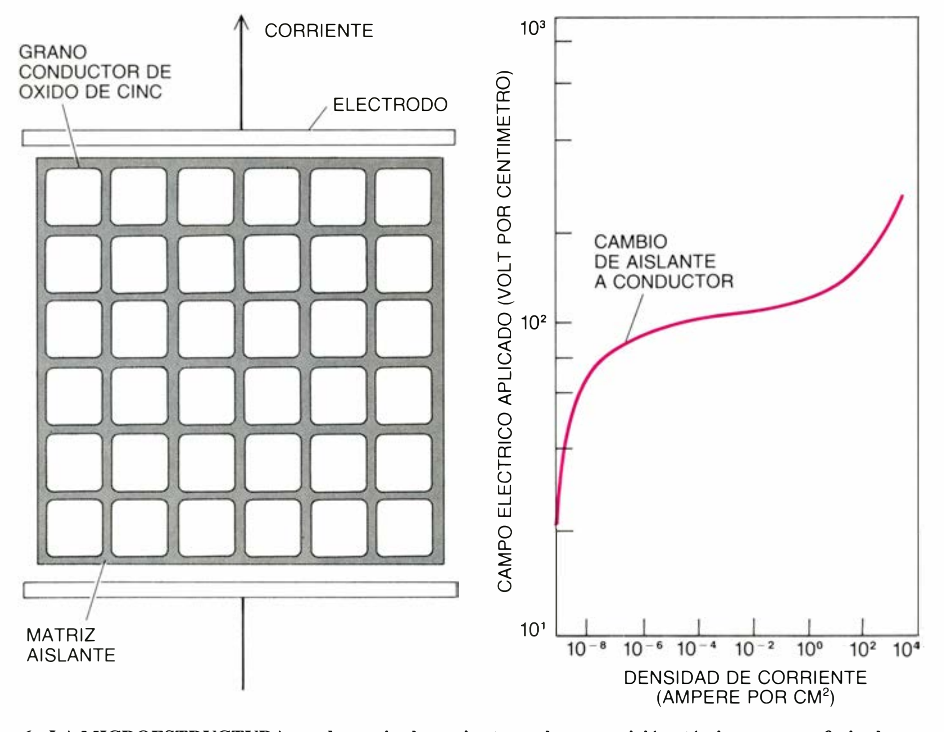
Ahora bien, la fuerza de los enlaces en las cerámicas impide, al propio tiempo, el fácil desplazamiento de planos atómicos entre sí; el material no puede deformarse (como ocurre con los metales dúctiles: el cobre, por ejemplo), para aliviar las tensiones impuestas por una carga. En razón de ello, los materiales cerámicos mantienen admirablemente su forma bajo una tensión, hasta que ésta excede cierto límite (el límite de fractura); entonces, los enlaces ceden de repente y el material se rompe catastróficamente. Una consecuencia de la fragilidad es que las cerámicas pueden resistir mucho mejor cargas de compresión (que compriman el material) que cargas de tracción (fuerzas que tiran del material) o cargas de corte (fuerzas que determinan que los planos del material se deslicen en direcciones opuestas). La razón estriba en lo siguiente: bajo cargas de compresión, las grietas incipientes tienden a cerrarse; bajo cargas de tracción o de corte, las superficies de las grietas tienden, por contra, a separarse.



4. **ENTRE LOS MATERIALES FRAGILES se cuentan los cerámicos; éstos tienen una estructura cristalina que no los hace fácilmente deformables. En consecuencia, una grieta estrecha que concentra tensiones (*flechas*) en su extremo que superan el límite en el que los enlaces del material se rompen, puede abrirse camino rápidamente a través de un material cerámico (*1-3*), haciendo que éste se rompa catastróficamente. Una grieta similar en un material dúctil (*4*) puede ensancharse y despuntarse cuando los enlaces se deforman, se rompen y se reúnen, permitiendo que los planos atómicos se deslicen mutuamente (*5, 6*).**



5. PROPIEDADES ELECTRICAS de la cerámica: dependen de su estructura cristalina y de los estados permitidos de energía de los electrones que forman los enlaces; ambos factores vienen determinados por la composición atómica. El óxido de cobalto (CoO) tiene una estructura tal que permite a los electrones debidamente excitados viajar a través de la red del cristal, tal como lo harían en un semiconductor como el silicio. El dióxido de vanadio (VO_2) se comporta como un semiconductor, pero a 330 grados Kelvin (unos 60 grados C) sufre un ligero cambio en la estructura cristalina, con lo que los electrones pueden entonces viajar a su través como lo harían en un metal conductor. El trióxido de renio (ReO_3) se distingue por ser conductor, independientemente de la temperatura. La conductividad del cobre se muestra a título comparativo.



6. LA MICROESTRUCTURA puede manipularse, junto con la composición atómica, para conferir al material cerámico propiedades eléctricas únicas. El óxido de cinc (ZnO) es un semiconductor, pero si se incluyen ciertas impurezas en la estructura cristalina puede convertirse en un buen conductor. Si los granos de ZnO dopados se incluyen en una matriz cerámica aislante, puede construirse un varistor (un resistor variable). El material aislante entre los granos de ZnO evita que la corriente fluya a través del varistor a bajo voltaje. A voltajes altos, sin embargo, los electrones tienen suficiente energía para superar la barrera de conducción entre los granos y viajan a través del varistor. El voltaje al cual el varistor pasa de mal a buen conductor se controla variando el tamaño y el dopado de granos de ZnO y el espesor de las capas aislantes entre granos.

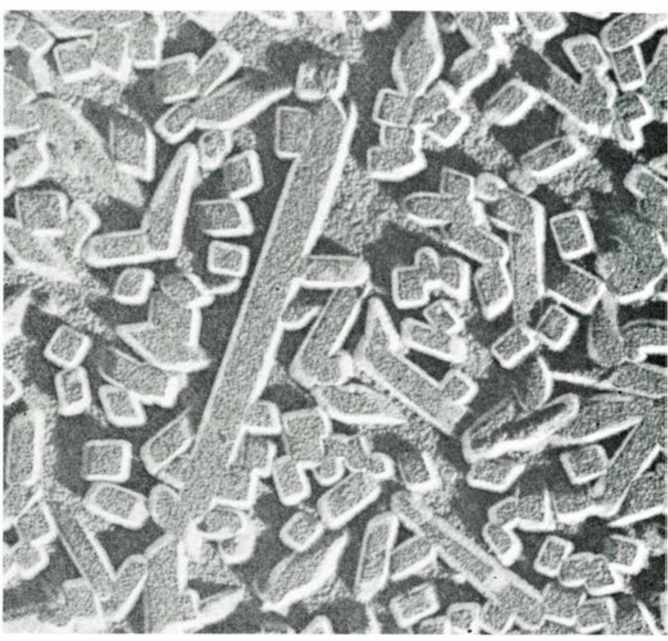
Los materiales cerámicos pueden adquirir mayor resistencia a la fractura si se eliminan los defectos minúsculos, tales como vacantes o impurezas químicas entre los granos del material. Cualquier tensión aplicada tiende a concentrarse en las posiciones defectuosas. Dado que el material cerámico no puede deformarse para aliviar las tensiones concentradas, el límite de fractura se sobrepasa fácilmente en las posiciones de esos defectos, aunque la mayor parte del material permanezca por debajo de ese umbral. Cuando se supera ese umbral en la posición de un defecto, se desarrolla una grieta. Y puesto que también concentra tensiones, la grieta se propaga rápidamente a través del material cerámico, provocando, en última instancia, su rotura.

La resistencia a la rotura frágil (el grado de dificultad con el que las grietas se propagan a través de un material bajo tensión) se mide cuantitativamente por su tenacidad. Muchos metales tienen valores de tenacidad superiores a 40 megapascal (MPa) por raíz cuadrada de metro; los metales frágiles, como el hierro colado, conocen tenacidades del orden de los 20 MPa por raíz cuadrada de metro. Las cerámicas tradicionales y los materiales vítreos, por el contrario, presentan valores de tenacidad de apenas 1 MPa por raíz cuadrada de metro.

Otras propiedades macroscópicas de los materiales cerámicos dependen de las peculiar disposición de los átomos en los cristales. Por ejemplo, la estructura cristalina del óxido de cobalto permite que los electrones, si están debidamente excitados, viajen a través de la red de manera parecida a como lo harían en un semiconductor de silicio. Por la misma razón, el dióxido de vanadio también actúa como un semiconductor a bajas temperaturas. Sin embargo, y a diferencia del óxido de cobalto, el dióxido de vanadio sufre una ligera modificación en su estructura cristalina alrededor de los 330 grados Kelvin (60 grados C); los electrones del material se comportan así como en un conductor metálico. La estructura cristalina del trióxido de renio, a diferencia de la de los otros dos óxidos metálicos, permite la conducción de la electricidad igual que en un metal, independientemente de la temperatura.

Las llamadas cerámicas ferroeléctricas proporcionan un ejemplo aún mejor de las propiedades que se originan en la arquitectura atómica de un material. Al poseer una distribución de-





7. GRANOS EXTREMADAMENTE PEQUENOS pueden cristalizaren forma de materiales vitrocerámicos. Las micrografías electrónicas, realizadas en la empresa Corning Glass Works, muestran un vidrio de aluminiosilicato no cristalino (*izquierda*) y el mismo material después de haberse tratado térmicamente para producir granos cristalinos (*derecha*). La muestra está aumentada en unos 70.000 diámetros. Debido a que granos más pequeños y más uniformes mejoran el material cerámico, los científicos encuentran en los métodos de procesado de las vitrocerámicas un camino para producir nuevos materiales cerámicos.

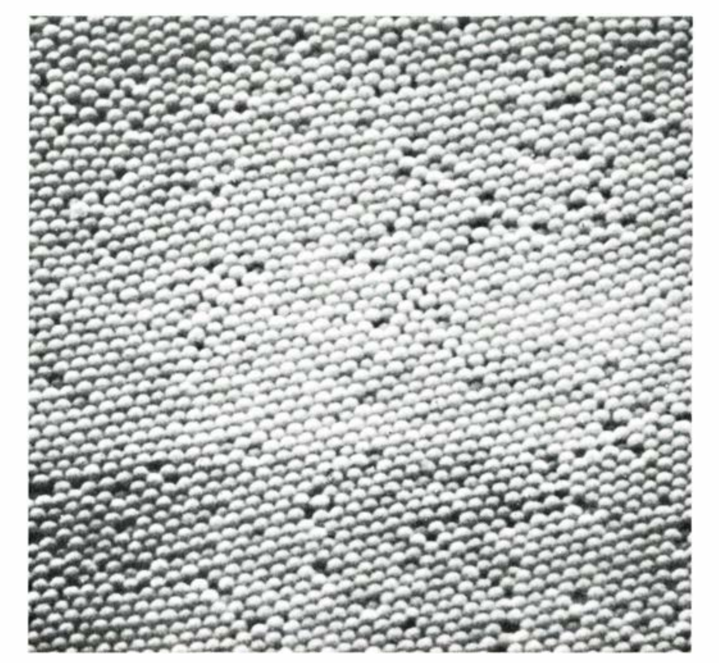
sigual de cargas en sus celdillas unitarias, los granos cristalinos que se encuentran en una cerámica ferroeléctrica se polarizan, es decir, una parte del grano se carga positivamente, mientras que la opuesta lo hace negativamente. No suele observarse una polarización neta de la cerámica, puesto que los granos polarizados están orientados al azar, anulando las cargas entre sí. Sin embargo, por aplicación de un campo eléctrico externo durante el procesado, los granos pueden reorientarse de forma que las direcciones de polarización se fortalezcan y confieran al material una distribución de carga macroscópicamente detectable. Ahora bien, la cerámica permanece no conductora incluso cuando está polarizada. Esta propiedad es la que se explota en la fabricación de condensadores que acumulen carga eléctrica; y por esta razón, los condensadores se fabrican principalmente con cerámicas.

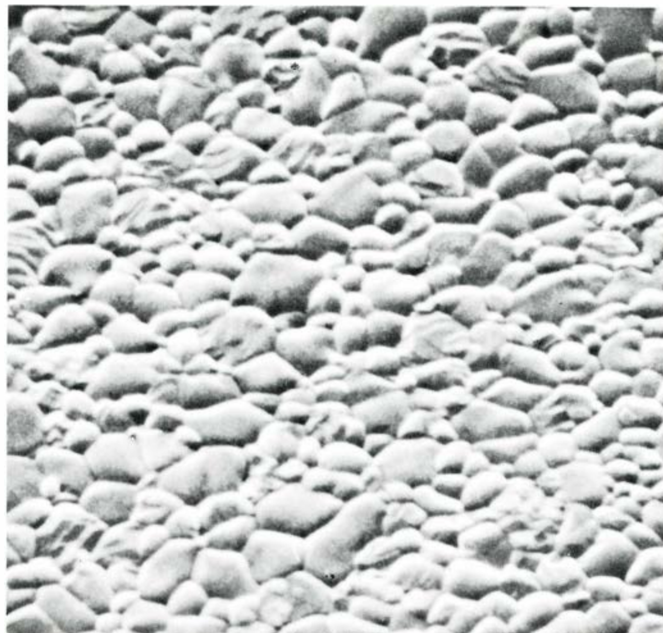
Si la distribución de cargas en un cristal de una cerámica ferroeléctrica no es simétrica respecto del centro del cristal, puede producirse un cambio de polaridad por deformación del cristal. En ese fenómeno se fundan las cerámicas piezoeléctricas. Cuando éstas se deforman mecánicamente, desarrollan una considerable carga eléctrica; pero si las sometemos a un campo eléctrico, se deformarán. Como los materiales cerámicos piezoeléctricos convierten eficazmente la energía mecánica en energía eléctrica, o viceversa, se hallan en el corazón de los transductores incorporados en los sistemas de sonar y en los equipos médicos de ultrasonidos. Las cargas generadas por la deformación mecánica de ciertas cerámicas piezoeléctricas pueden alcanzar decenas de miles de volt. Las chispas que pueden inducirse por el voltaje así producido se usan para la ignición en calentadores de gas, cocinas y mecheros.

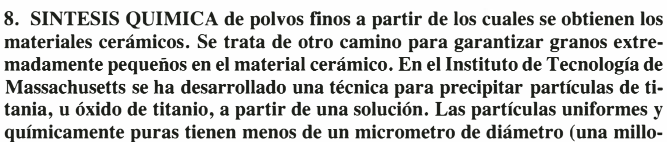
Las propiedades implícitas de la estructura atómica de un material cerámico puede, a veces, combinarse fructíferamente con una microestructura particular para dar al material las propiedades especiales deseadas. Tal es el caso de la fabricación de varistores (resistores variables) de óxido de cinc. Los cristales de óxido de cinc (ZnO) son normalmente semiconductores, pero pueden convertirse en buenos conductores eléctricos por inclusión de ciertas impurezas en su estructura cristalina (proceso llamado de dopado). Si se introduce un conjunto ordenado de granos de ZnO dopado en una matriz cerámica aislante, las propiedades eléctricas del material resultante pueden hacerse altamente no lineales. A bajo voltaje, el material muestra una conductividad eléctrica asimismo baja, puesto que la matriz aislante impide el paso de corriente eléctrica entre los granos de ZnO. A voltajes altos, sin embargo, los electrones que transportan la corriente tienen energía suficiente para superar las barreras aislantes entre los granos conductores de ZnO, con lo que el material resultante es altamente conductor. El voltaje al cual tiene lugar el cambio de mal conductor a buen conductor puede fijarse variando la microestructura, es decir, el tamaño de grano del ZnO y la anchura de las capas aislantes entre los granos. De esta manera, los varistores de ZnO han encontrado aplicación como protectores automáticos contra cortocircuitos en montajes eléctricos de casi cualquier voltaje.

La composición química y la microestructura de una cerámica determinan, en última instancia, todas sus propiedades macroscópicas. Y están, a su vez, determinadas por los métodos de procesamiento. Dado que es más fácil, en muchos aspectos, procesar cerámicas (al igual que metales y plásticos) a partir de un estado fundido, los vidrios y los cristales monolíticos se procesan de esta forma. Cierto tipo de cerámica moderna, la llamada vitrocerámica, combina el sencillo procesado del vidrio con la durabilidad de la cerámica policristalina.

En el procesado de materiales vitrocerámicos, que empezó en la empresa Corning Glass Works, hace unos 30 años, las materias primas se funden y el objeto se conforma mientras el material se halla en un estado vítreo. Los agentes nucleantes especiales incluidos en el fundido, y el tratamiento térmico subsiguiente, favorecen el crecimiento de minúsculos cristales en el vidrio.







8. SINTESIS QUIMICA de polvos finos a partir de los cuales se obtienen los materiales cerámicos. Se trata de otro camino para garantizar granos extremadamente pequeños en el material cerámico. En el Instituto de Tecnología de Massachusetts se ha desarrollado una técnica para precipitar partículas de titania, u óxido de titanio, a partir de una solución. Las partículas uniformes y químicamente puras tienen menos de un micrometro de diámetro (una millonésima de metro). Como se muestra en estas micrografías, obtenidas con microscopio electrónico, las partículas pueden empaquetarse tan densamente (*izquierda*) que no queden huecos entre los granos de la cerámica producida cuando las partículas están sinterizadas (*derecha*), es decir, "soldadas" entre sí por calentamiento a una temperatura bastante inferior a la de fusión total del material. Gracias a su microestructura libre de huecos, este material cerámico es tenaz.

Merced a los granos cristalinos, las vitrocerámicas presentan mayor resistencia a la fractura y a las altas temperaturas que los vidrios convencionales no cristalinos.

Aunque el vidrio blando viscoso que puede obtenerse de un fundido cerámico está sujeto a un procesado global rápido, el rango completo de propiedades de los materiales cerámicos avanzados no puede a menudo alcanzarse si el material se encuentra en estado vítreo. De ahí que muchos materiales cerámicos avanzados se fabriquen a través de un proceso en múltiples etapas que complica notablemente la tarea de manipular la composición y la microestructura.

El proceso de fabricación de los nuevos materiales cerámicos se parece, en principio, bastante al que se sigue en la fabricación de artículos tradicionales de arcilla. Para producir en serie piezas de alfarería cocida, se muelen primero los minerales naturales y se mezclan en un polvo fino de arcilla. Se añade agua para formar una masa plástica. La masa se conforma mediante las técnicas acostumbradas de moldeo por inyección (en el que la arcilla se comprime en un molde cerrado), moldeo por extrusión (en el que la arcilla se fuerza a través de un troquel que tiene la sección deseada) o colado (en el que una suspensión acuosa de arcilla se vierte sobre un molde poroso que absorbe el exceso de agua). El objeto conformado se seca al aire antes de introducirlo en el horno. Allí se cuece a una temperatura inferior a la de fusión completa del material, según un proceso de sinterización. Durante ésta, las partículas de arcilla se van "soldando", hasta eliminar la mayor parte de los huecos entre las partículas; por consiguiente, el objeto se contrae.

En la manufactura de los nuevos productos cerámicos se siguen pasos similares, con una salvedad: se añaden polímeros orgánicos aglomerantes, en vez de agua, para convertir el polvo fino inicial en una masa maleable. Los aglomerantes se queman y eliminan en el proceso de sinterización. Se pueden añadir también otros productos orgánicos, llamados defloculantes, para evitar la aglomeración del polvo en agregados que darían lugar a una sinterización irregular y a la formación de huecos. A veces, la aplicación de una presión antes de la sinterización, o durante la misma, ayuda a densificar el material, "estrujando" los huecos en la masa del polvo; esto ayuda también a reducir la contracción irregular y el agrietamiento.

Puesto que el talón de Aquiles de un material cerámico es su propensión a la rotura frágil, y dado que los defectos microscópicos tales como huecos, aglomerados e impurezas químicas están en las posiciones en las que se originan las grietas, muchas de las investigaciones actuales en cerámica se han dirigido hacia la eliminación de tales defectos. Una forma de hacerlo es partir de un polvo finísimo, de alta pureza química, y empaquetarlo estrechamente antes de la sinterización.

En el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), se ha desarrollado un método para precipitar partículas de una solución uniforme de titania, u óxido de titanio (TiO_2), con un diámetro inferior al micrometro. Las partículas se suspenden luego en otra solución, a la que se han añadido polímeros orgánicos. Los polímeros se adsorben sobre la superficie de las partículas, evitando que éstas se acerquen lo suficiente como para formar aglomerados. El material cerámico policristalino que resulta tras el empaquetamiento controlado y la sinterización de las partículas tiene una densidad muy próxima a la teórica; no hay, pues, huecos entre los granos del cristal. Debido a esta microestructura libre de huecos, el material es muy resistente y tenaz.

Otro método, desarrollado también en el MIT, puede producir partículas diminutas de alta pureza química. Un compuesto gaseoso de silicio e hidrógeno se calienta mediante un láser de dióxido de carbono de alta potencia. La breve e intensa aplicación de calor descompone el gas, liberando el silicio

en forma de partículas extremadamente finas. Suspendiendo estas partículas en una solución que permita controlar su carga eléctrica, se puede conseguir empaquetarlas estrechamente en una estructura libre de defectos.

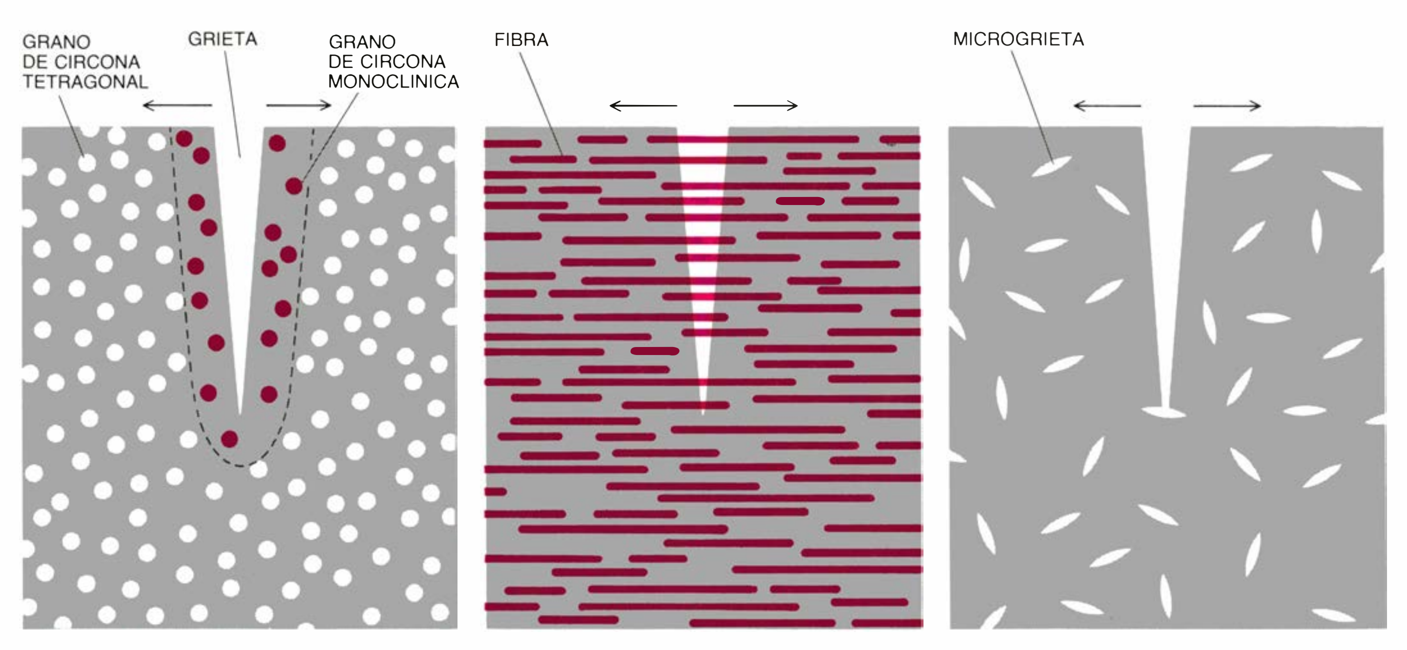
Estos nuevos métodos de procesado permiten a los científicos que estudian los materiales controlar una microestructura cerámica sobre escalas que varían en ocho órdenes de magnitud: a nivel atómico (controlando la pureza química y la temperatura y presión de la sinterización), a una escala de unas cien veces el tamaño de un átomo (controlando el tamaño de las partículas y los fenómenos superficie-partícula), a una escala de milésimas de milímetro (controlando el tamaño del grano y del poro mediante un empaquetamiento apropiado del polvo) y, finalmente, a la escala macroscópica del producto que se está fabricando.

En conjunción con unos mejores métodos de procesado, diseñados con la idea de reducir el número de defectos creadores de grietas, se están desarrollando nuevas formas para aumentar la tenacidad de los materiales cerámicos, las cuales detienen las grietas, una vez se han formado por esfuerzos de tracción o tangenciales. Un método para elevar la resistencia a la propagación de grietas es el reforzamiento por transformación. En este método de reforzamiento, se aprovecha la transformación de la estructura cristalina de la circona, o dióxido de circonio (ZrO_2), inducida mediante tensiones en el extremo de una grieta. Este cambio aumenta el volumen del cristal de circona entre un tres y un cinco por ciento. De esta manera, una grieta que se aproxime a los granos de circona embebidos en una matriz provoca la expansión de éstos. Expansión que induce una compresión local de la matriz: oprime la grieta y detiene su propagación. Dichos granos de circona se han incorporado ya a muchos materiales cerámicos, algunos de los cuales muestran una resistencia a la fractura superior a los 15 MPa por raíz cuadrada de metro.

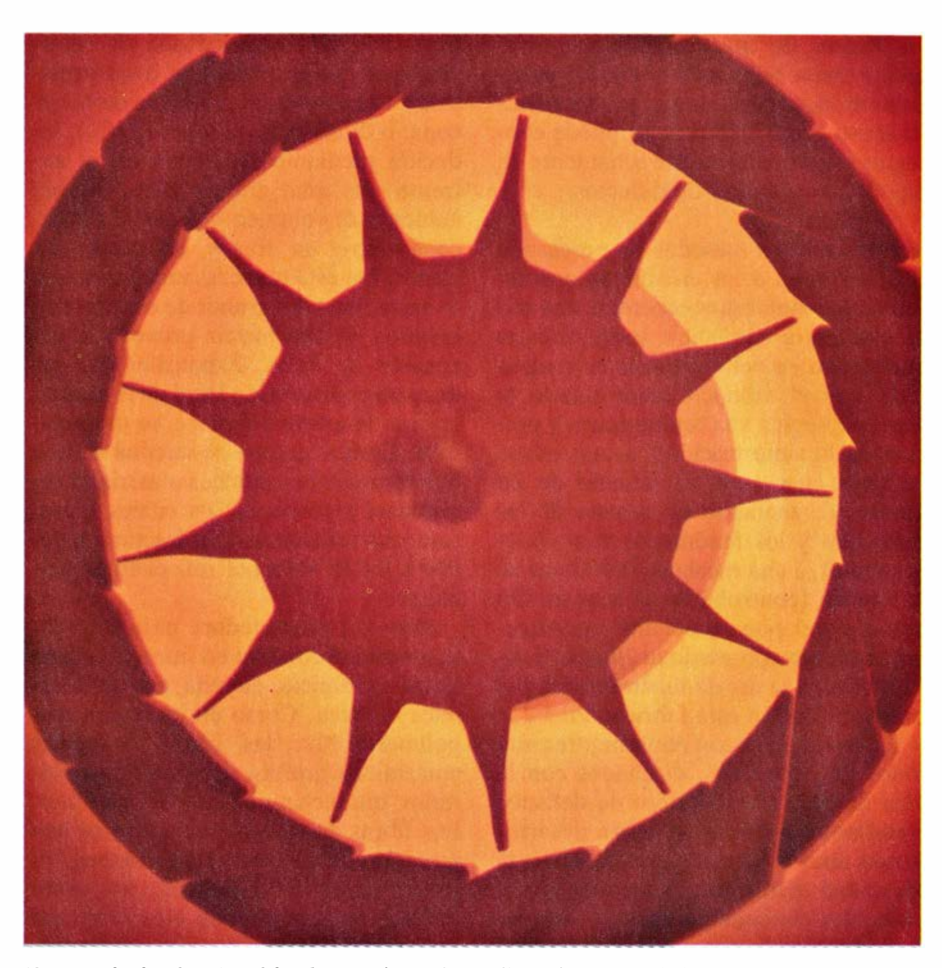
Otra vía prometedora para reforzar la tenacidad consiste en intercalar finas fibras cerámicas en una matriz cerámica o vítrea. Como en un compuesto polímero-fibra, las fibras cerámicas amarran las grietas, impidiendo su posterior ensanchamiento y crecimiento. Las fibras de carburo de silicio se han incorporado ya a materiales vítreos, vitrocerámicos y cerámicos; los compuestos resultantes han mostrado una resistencia significativa a la rotura frágil, que no distinguía precisamente a los materiales cerámicos monolíticos.

El principio en que se basa un tercer método de reforzamiento es el mismo que subyace en el procedimiento acostumbrado para detener grietas visibles en las placas de acero. Se trata de lo siguiente: redondeando el extremo de una grieta se pueden disipar las tensiones en dicho extremo a lo largo de una gran área, reduciéndola por debajo del límite de fractura. En el caso de las placas de acero se hace taladrando un agujero en el extremo de la grieta. En el caso de los materiales cerámicos, pequeñas grietas, denominadas microgrietas, se dispersan, de intento, a través del material en el curso de su procesado. Cuando un extremo de una grieta alcanza una de las microgrietas, aquélla se redondea de forma parecida.

Estos y otros avances en el procesado y diseño microestructural han permitido a los especialistas en materiales cerámicos sintetizar clases enteras de nuevos materiales con unas propiedades que los materiales metálicos u orgánicos no pueden ofrecer. En virtud de estas propiedades, los componentes cerámicos han desempeñado y seguirán desempeñando un papel principal, si no crítico, en el desarrollo de productos, procesos de fabricación e, incluso, industrias enteras. Los materiales cerámicos avanzados actúan como "generadores" de tecnología, satisfaciendo las especiales demandas que las nacien-



9. LOS MECANISMOS DE REFORZAMIENTO permiten que una grieta en un material cerámico pueda detenerse y completan las nuevas técnicas de procesado que pretenden eliminar imperfecciones iniciadoras de grietas. Los mecanismos de reforzamiento (*izquierda*) se basan en el cambio de estructura cristalina (de tetragonal a monoclínica) que sufren los granos de circona, u óxido de circonio (ZrO_2), cuando se someten a tensiones en el extremo de una grieta. Dado que los granos monoclínicos tienen un volumen ligeramente superior, pueden comprimir la grieta cuando ésta se expande en el curso de la transformación. Los materiales cerámicos también se pueden hacer resistentes a la fractura entrelazándolos con fibras cerámicas (*centro*), como en el caso de los materiales compuestos. Las fibras amarran la grieta y evitan que se ensanche y crezca. Una tercera vía para frenar una grieta consiste en esparcir la concentración de tensiones del extremo sobre una superficie mayor. Para conseguirlo se crean grietas diminutas, las denominadas microgrietas (*derecha*), en el material cerámico durante su procesado. Cuando una grieta se funde, en su aproximación, con una microgrieta, su extremo se redondea. (Esquema de George V. Kelvin.)



10. UN ROTOR CERAMICO (*objeto en forma de estrella*) mejora el rendimiento de un nuevo motor de turbina de gas, permitiéndole operar a temperaturas donde el rotor metálico falla. El dispositivo fue desarrollado por las empresas Garrett y Ford, para el Departamento de Energía de EE.UU. y la NASA.

tes tecnologías hacen de nuevos materiales.

Dos ejemplos de este papel generador que ha representado la cerámica en los últimos años son el desarrollo de los imanes de ferrita para núcleos magnéticos de memoria, sin los cuales los ordenadores de alta velocidad no podrían haberse creado, y el desarrollo de fibras ópticas de sílice, sin las cuales los sistemas de telecomunicación no podrían afrontar necesidades futuras de forma rentable.

Podrían citarse otros ejemplos del pasado, pero son las nacientes aplicaciones potenciales de la cerámica avanzada las que los científicos e ingenieros buscan en muchos campos, mirando hacia el futuro. En esta línea, las cerámicas se están incorporando ahora a los motores de combustión interna. Los principales beneficios que pueden derivarse de su incorporación son altas temperaturas de funcionamiento y un menor peso total del motor, lo cual se traduce en un mayor rendimiento. Además, y debido a su excelente resistencia al desgaste, los componentes cerámicos no requieren una lubricación exhaustiva.

La empresa Nissan de motores, industria japonesa del sector automovilístico, ha introducido ya un vehículo con un rotor turbo de nitruro de silicio en su motor. La empresa Cummins ha estado probando un motor diesel para camiones con cabezas de pistón, cojinetes y camisas de cilindros cerámicos que permiten el funcionamiento sin un sistema de refrigeración. Varias firmas estadounidenses están desarrollando motores con turbina de gas cerámica para automóviles, y la Rolls Royce está experimentando con motores similares para helicópteros.

Los materiales cerámicos tienen también muchas aplicaciones potenciales si cambian sus propiedades eléctricas cuando se exponen a ciertos productos químicos. Las moléculas de líquidos o gases que interaccionan con una de estas cerámicas, en forma de gránulos porosos, por ejemplo, podrían cambiar la resistencia eléctrica de la cerámica, de fácil medición. El diseño de un sensor basado en este prin-

cipio no encierra especial dificultad; basta, a menudo, con sólo un par de contactos eléctricos. La no reactividad y la resistencia a la corrosión de los materiales cerámicos permitiría a los sensores fabricados con estos materiales comportarse considerablemente mejor en ambientes químicos agresivos que los sensores convencionales.

Uno de esos dispositivos, que tiene miles de aplicaciones potenciales en sistemas de aire acondicionado, secadores y equipos respiratorios, es un sensor de humedad. Se han desarrollado otros sensores cerámicos para detectar la presencia de metano, constituyente principal del gas natural; pueden mejorar la seguridad en los hogares en los que se usa el gas para calentar o cocinar. Por último, un solo artificio cerámico que sirviera como sensor de temperatura, presión, luz y calor, además de ciertos agentes químicos, podría acoplarse a un microprocesador para controlar las máquinas en el hogar, los transportes y las fábricas.

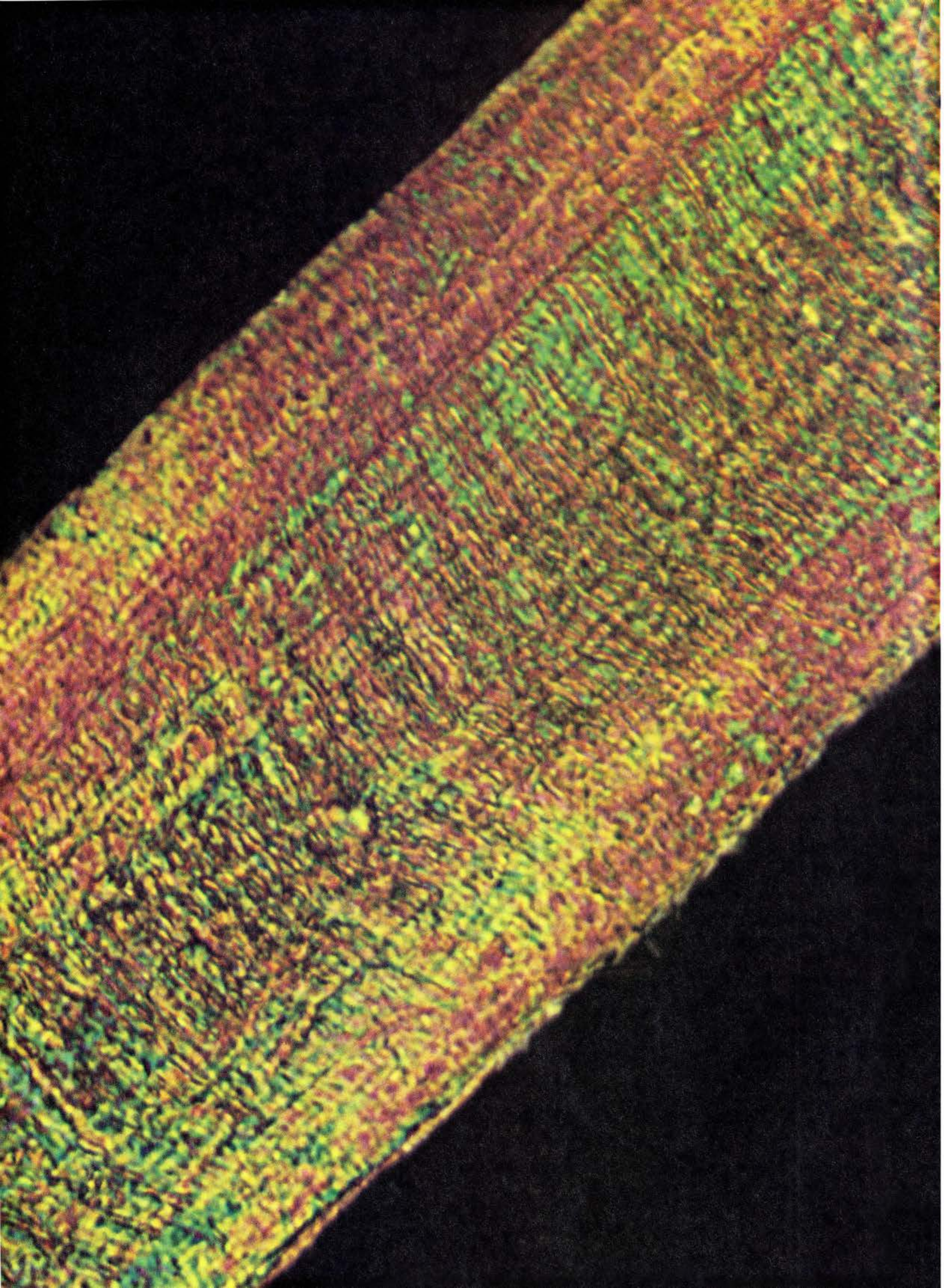
Otra área de crecimiento se encuentra en los materiales cerámicos piezoeléctricos. Limitémonos a citar dos nuevas aplicaciones del mayor interés. La primera consiste en una cabeza de inyección de tinta de imprenta de alta precisión. La cabeza consta de cientos de diminutos tinteros piezoeléctricos. Por aplicación selectiva de un voltaje a los tinteros, pueden hacerse contraer repentinamente, con lo que se inyecta tinta sobre el papel en modelos que corresponden a caracteres. Con esta cabeza impresora se pueden obtener finos detalles y coloreado; además, requiere muy poco espacio y menores voltajes, comparada con otras cabezas.

Se pueden construir también motores de conducción directa a partir de materiales cerámicos piezoeléctricos, por conversión en movimiento traslacional o rotacional de la dilatación de la pieza cerámica cuando se expone a un campo eléctrico. Estos motores son compactos, ligeros y simples, ya que no requieren cables para dirigir el campo. Pueden detenerse y comenzar sin deslizamiento, proporcionando además un par elevado a bajas velocidades: se puede mover lenta y precisamente kilogramos de carga.

Un motor de este tipo, desarrollado por la empresa de electricidad industrial Shinse, de Japón, es un motor lineal de conducción directa. La masa a mover se coloca sobre un raíl fijo de cerámica piezoeléctrica. La aplicación de un voltaje de alta frecuencia sobre el raíl produce "rizos" en su superficie, capaces de dirigir la masa hacia delante o hacia atrás sobre el raíl. Se están considerando cientos de aplicaciones en máquinas, instrumentos y productos de consumo para estos motores.

En muchos sentidos, la cerámica representa la mayor oportunidad del hombre para elaborar de forma económica un producto acabado a partir de materias primas sin valor. Las propiedades físicas del material se pueden modificar o fortalecer bien mediante diminutos cambios en la composición o en la orientación de los granos, bien combinando materiales cerámicos diferentes en un material compuesto, bien eliminando (o creando intencionadamente) huecos. Los especialistas en materiales cerámicos están ganando terreno en el necesario control preciso sobre la composición y la microestructura mediante la cristalización de vidrios, el uso de polvos extremadamente finos de alta pureza química y a través del empaquetamiento químico denso de los polvos de partida. Además, las especies químicas que forman los materiales cerámicos están entre las más abundantes de la Tierra. Por consiguiente, las materias primas para la cerámica serán probablemente durante mucho tiempo más baratas que las materias primas para los materiales substitutivos más próximos, que son generalmente aleaciones metálicas especiales que contienen elementos caros y relativamente raros tales como cobalto, niobio, wolframio y cromo.

Aunque la susceptibilidad de la cerámica a pequeñas imperfecciones durante el procesado significa que no es fácil hacer y conformar cerámicas de calidad suficientemente elevada a bajo coste, el valor potencial de los materiales cerámicos crece con cada aumento en la pureza y homogeneidad, lo que hace que merezca la pena continuar explorando nuevas vías para lograr virtualmente la perfección en el procesado. Sin embargo, no basta alcanzar la perfección en el laboratorio. Los procesos de laboratorio óptimos deben trasladarse después a procesos a escala industrial sin abandonar el control exquisito de la composición y la microestructura. La investigación de técnicas de procesamiento delicadas que puedan aumentarse hasta proporciones comerciales hace del procesado de la cerámica avanzada uno de los grandes desafíos de la ingeniería para el resto del siglo.



Nuevos polímeros

Los avances en la síntesis y en los métodos de procesado están generando polímeros con cualidades sin precedentes, como consecuencia de los nuevos conocimientos adquiridos sobre la relación entre estructura y propiedades

Eric Baer

Treinta años atrás, las aplicaciones de la mayoría de los polímeros se limitaban a usos especiales en productos tales como fibras, películas y revestimientos, o bien a su utilización habitual como materiales plásticos, económicos, para prestaciones ligeras. Aunque los materiales tradicionales han venido manteniendo su dominio en el ámbito exigente de las altas tecnologías, algunos polímeros ya están reemplazando al aluminio y a otros metales estructurales en aplicaciones que requieren grandes esfuerzos mecánicos y exposición a altas temperaturas. Otros polímeros llegan incluso a sustituir a los materiales tradicionales en las comunicaciones ópticas y electrónicas y en los ordenadores. Cada una de estas nuevas aplicaciones constituye una muestra del enorme grado de control que puede ejercerse sobre las propiedades de los materiales poliméricos.

Esta ciencia encuentra su fuerza en la infinita versatilidad que presentan los polímeros sintéticos. No sólo el material acabado, sino también sus constituyentes básicos, las moléculas de polímero, se hacen a medida. La molécula de un polímero se construye a partir de unidades moleculares menores: los monómeros, que se repiten cientos o miles de veces en una estructura en cadena. La elección de los monómeros y el modo en que éstos se ensamblan definen las propiedades del material resultante.

El polímero puede diseñarse también a una escala mayor. Como si se tratara de un metal o un material compuesto, se le puede dar una microestructura; por ejemplo, una disposición orientada de las moléculas o una distribución controlada de regiones que difieran en composición. Los productos "por encargo" de la química de polímeros se conforman luego mediante procesos de transformación, según lo requieran las distintas necesidades.

El primer nivel en que los investigadores han logrado influir en las propiedades de los materiales poliméricos y que, por el momento, constituye uno de los campos más fructíferos para ejercer tal control, es el relativo al diseño a escala molecular. Cuatro factores inherentes al diseño de las macromoléculas, o cadenas de polímero, inciden de manera decisiva en el comportamiento físico del material: la longitud promedio de las cadenas, la magnitud de las fuerzas entre las cadenas de polímero, la regularidad con que dichas cadenas se empaquetan entre sí y la rigidez de las cadenas individuales en cada polímero. El primer factor –el de longitud promedio– deberá superar un cierto umbral para que el material alcance unos valores útiles de rigidez y tenacidad.

Las fuerzas intermoleculares más intensas se presentan cuando las cadenas se diseñan para entrecruzarse, es decir, para establecer enlaces químicos entre sí, hecho que ocurre a menudo cuando el polímero se calienta durante su procesado final. Gracias a ese entrecruzamiento, las cadenas de polímero se traban en una red tridimensional, lo que impide que tales polímeros se moldeen de nuevo mediante calentamiento. Los plásticos rígidos de este tipo se llaman termoestables, representantes de los cuales son las resinas fenólicas. Los plásticos termoestables fueron de los primeros polímeros en mostrar alta resistencia mecánica y térmica. Los cauchos, tanto el natural como los sintéticos, también se entrecruzan cuando se tratan térmicamente. Esta estructura entrecruzada les permite soportar altas temperaturas y repetidos esfuerzos mecánicos sin acabar deformándose irreversiblemente. Por el contrario, muchos polímeros avanzados actuales, como los plásticos comunes empleados en los artículos de consumo, son termoplásticos, materiales que se reblandecen al calentarlos. Las cadenas de polímero de un termoplástico, aunque pueden interaccionar entre sí de múltiples maneras, permanecen químicamente diferenciadas.

La presencia de atracciones fuertes entre las moléculas de un termoplástico aumenta la tenacidad y la resistencia a los disolventes, razón por la cual los investigadores de polímeros tienden a diseñar las cadenas moleculares para que dichas atracciones se incrementen. En el poliestireno puro, que consiste en una cadena principal de átomos de carbono enlazados covalentemente y rodeados por átomos de hidrógeno, de la que cuelga un anillo bencénico como sustituyente de uno de cada dos átomos de la cadena principal, la molécula es apolar, es decir, carece de concentraciones localizadas de carga positiva o negativa que pudieran dar lugar a fuerzas electrostáticas entre las cadenas. Sólo las débiles atracciones intermoleculares conocidas como fuerzas de van der Waals mantienen unidas las cadenas; ello hace que el poliestireno sea vulnerable a los disolventes orgánicos y se reblandezca a una temperatura bastante baja, aproximadamente 100 grados Celsius.

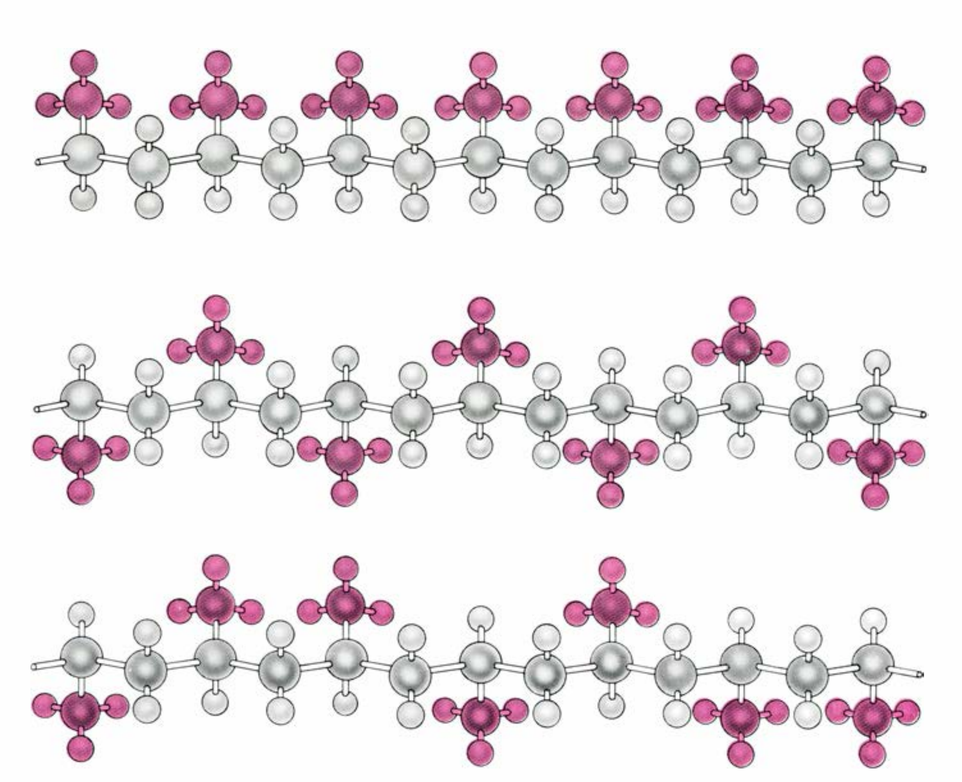
1. FIBRA EXPERIMENTAL DE ALTA PRESTACION, observada con luz polarizada, que permite mostrar la estructura orientada que le confiere gran rigidez y resistencia a la tracción. El polímero con el que se preparó la fibra tiene carácter de cristal líquido; es decir, cuando está en fase líquida (fundido en este caso), sus rígidas moléculas en forma de varilla pueden alinearse fácilmente. En las fibras hiladas a partir del fundido, las moléculas se alinean casi paralelas al eje de la fibra, produciendo la estructura fibrilar visible en la microfotografía. Se cree que las bandas transversales corresponden a la presencia de una ondulación periódica en la orientación molecular, ya que en fibras totalmente orientadas del mismo polímero dichas bandas no aparecen. Estas fibras se encuentran en fase experimental y se desarrollaron en la Celanese Research Co. Linda C. Sawyer, de Celanese, que ha analizado su estructura, nos ha proporcionado esta imagen.

POLIMERO	UNIDAD REPETITIVA	TEMPERATURA DE FUSION	TEMPERATURA DE TRANSICION VITREA
POLICLORURO DE VINILO	$-CH_2-CH(Cl)-$	—	82
POLIESTIRENO ATACTICO	$-CH_2-CH(C_6H_5)-$	—	100
POLIMETACRILATO DE METILO ATACTICO	$-CH_2-C(CH_3)(C(=O)-O-CH_3)-$	—	105
POLI (OXIDO DE 2,2′-DIMETIL FENILENO) (PPO)	$-O-C_6H_2(CH_3)_2-$	—	135
POLIETILENO LINEAL	$-CH_2-CH_2-$	138	−110
POLIPROPILENO ISOTACTICO	$-CH_2-CH(CH_3)-$	165	−10
POLI (OXIDO DE METILENO)	$-CH_2-O-$	180	−85
POLI (TEREFTALATO DE BUTILENGLICOL)	$-O-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-O-C(=O)-C_6H_4-C(=O)-$	240	17
POLI (ADIPATO DE HEXAMETILENDIAMINA)	$-NH-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-NH-C(=O)-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-C(=O)-$	265	50
POLI (TEREFTALATO DE ETILENGLICOL)	$-O-CH_2-CH_2-O-C(=O)-C_6H_4-C(=O)-$	265	70
POLITETRAFLUOROETILENO	$-CF_2-CF_2-$	327	−150
POLI (CARBONATO DE 4,4′-DIHIDROXI-2,2′-DIFENILPROPANO)	$-O-C_6H_4-C(CH_3)_2-C_6H_4-O-C(=O)-$	—	149
POLIETERSULFONA	$-C_6H_4-C(CH_3)_2-C_6H_4-O-C_6H_4-SO_2-C_6H_4-$	—	190
POLIARILATO	$-O-C_6H_4-C(CH_3)_2-C_6H_4-O-C(=O)-C_6H_4-C(=O)-$	—	190
POLI (SULFURO DE FENILENO)	$-C_6H_4-S-$	285	185
COPOLIMERO AMIDA-IMIDA	$-C_6H_4-NH-C(=O)-C_6H_3(C(=O))_2N-$	—	SUPERIOR A 290
POLIETERETERCETONA	$-O-C_6H_4-O-C_6H_4-C(=O)-C_6H_4-$	334	143
COPOLIESTER AROMATICO DE LOS ACIDOS 6,2-HIDROXINAFTOICO Y 1,4-HIDROXIBENZOICO	$-O-C_6H_4-C(=O)-O-C_{10}H_6-C(=O)-$	INTERVALO TERMICO ANCHO	
POLI (PARAFENILENBENZOBISIMIDAZOL) (PBI)	$-C(=N)(-NH-)C_6H_2(-NH-)(N=)C-C_6H_4-$	TEMPERATURA DE DESCOMPOSICION	SUPERIOR A 400
POLI (PARAFENILENBENZOBISOXAZOL) (PBO)	$-C(=N)(-O-)C_6H_2(-O-)(N=)C-C_6H_4-$	TEMPERATURA DE DESCOMPOSICION	SUPERIOR A 400
POLI (PARAFENILENBENZOBISTIAZOL) (PBT)	$-C(-S-)(=N)C_6H_2(-S-)(N=)C-C_6H_4-$	TEMPERATURA DE DESCOMPOSICION	SUPERIOR A 400
POLIIMIDA	$-C_6H_4-N(C(=O))_2C_6H_2(C(=O))_2N-$	TEMPERATURA DE DESCOMPOSICION	SUPERIOR A 400
POLIFENILO	$-C_6H_4-$	TEMPERATURA DE DESCOMPOSICION	SUPERIOR A 530

2. MUESTRARIO DE POLIMEROS. Presenta, para cada caso, la unidad química básica, el monómero, que se repite cientos o miles de veces en la cadena completa de polímero. La tabla indica la resistencia al calor en grados centígrados. Los polímeros de los que sólo se da la temperatura de transición vítrea son amorfos, o vítreos; tales polímeros son rígidos por debajo de dicha temperatura y altamente viscosos por encima de la misma. Para los polímeros semicristalinos, la tabla muestra la temperatura de fusión a la que las regiones cristalinas se vuelven fluidas, y una temperatura de transición vítrea, que concierne a las regiones amorfas que rodean las áreas cristalinas. Se observa, asimismo, una correlación aproximada entre la resistencia al calor y la presencia de grupos aromáticos (representados a través de hexágonos) u otros elementos cíclicos que confieren rigidez a la cadena principal de la molécula del polímero. Muchos de los polímeros avanzados son mezclas que combinan varios de los materiales que aparecen en esta tabla. (La ilustración ha sido recreada por Ian Worpole.)

Si a lo largo de la cadena del polímero se sitúan monómeros más polares –monómeros con una distribución de carga menos simétrica–, la atracción electrostática contribuirá también a las fuerzas intermoleculares. Así, los monómeros apolares de estireno pueden intercalarse con monómeros más polares de acrilonitrilo, con lo cual se incrementa la cohesión de las moléculas y, por ende, la resistencia del material a los disolventes. En la actualidad, la copolimerización de estireno y acrilonitrilo es un proceso rutinario, y muchos otros polímeros comerciales incorporan, en forma semejante, dos o más monómeros diferentes.

En ciertos copolímeros, los distintos monómeros no se distribuyen al azar a lo largo de la cadena, como ocurre en el copolímero estireno-acrilonitrilo, sino que se agrupan en bloques, a lo largo de los cuales se repite sin interrupción un único monómero. Cuando los bloques de distinta constitución son inmiscibles –mutuamente insolubles, como aceite y agua–, los bloques formados por el mismo monómero, aun perteneciendo a macromoléculas distintas, tienden a coalescer. De esta manera, el material polimérico experimenta una segregación en dominios diminutos, correspondientes a los diversos polímeros, cuya forma y tamaño puede controlarse modificando la longitud de los bloques. El ejemplo mejor conocido de copolímero de bloques es el constituido por secuencias alternantes de estireno y butadieno. El polímero de butadieno es un elastómero o caucho sintético. Cuando el estireno es el constituyente dominante, el copolímero estireno-butadieno retiene la mayor parte de la rigidez del propio poliestireno, pero al mismo tiempo queda reforzado por las minúsculas partículas de elastómero que se dispersan en la matriz continua del poliestireno.

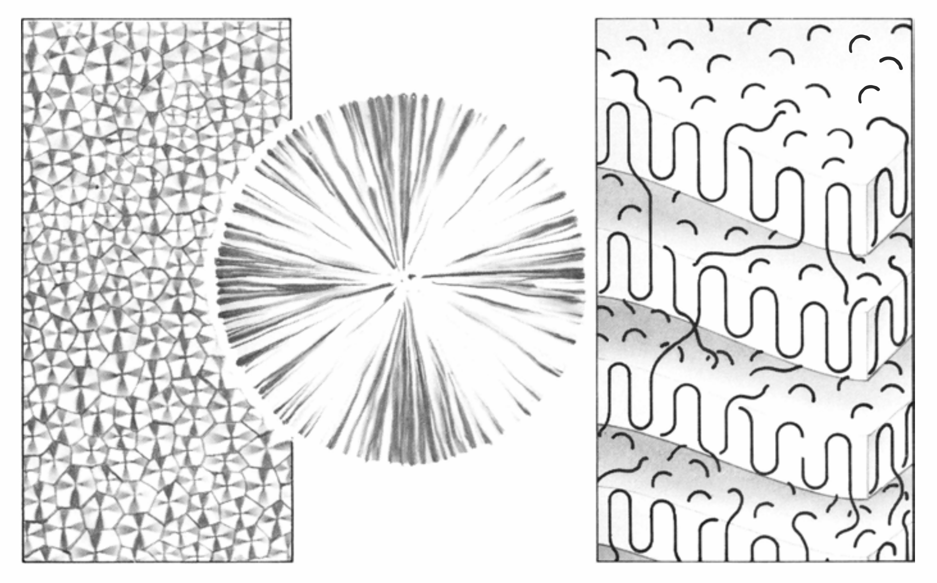


3. EN RAZON DE LA TACTICIDAD, o disposición ordenada de los grupos laterales, se distinguen entre sí polímeros químicamente idénticos. Estas tres cadenas de polipropileno varían únicamente en que las dos de arriba se han construido de forma que el grupo metilo (tres átomos de hidrógeno enlazados a uno de carbono), unido al segundo de cada par de átomos de carbono de la cadena principal, tenga una orientación predecible, estando siempre al mismo lado de la cadena (*arriba*), situándose alternativamente a ambos lados (*centro*). Esta regularidad tridimensional permite a las moléculas de un polímero táctico adoptar un empaquetamiento denso y regular, que confiere al material su carácter parcialmente cristalino. Un polímero atáctico, ejemplo del cual es la forma de polipropileno en la que los grupos metilo se orientan aleatoriamente (*abajo*), es amorfo. Dado que las cadenas de polímero se empaquetan más densamente en las regiones cristalinas, las formas tácticas del polipropileno son más rígidas y resistentes al calor que la variedad atáctica. La compleja geometría del polipropileno táctico se simplifica en estos diagramas; en realidad, forma hélices.

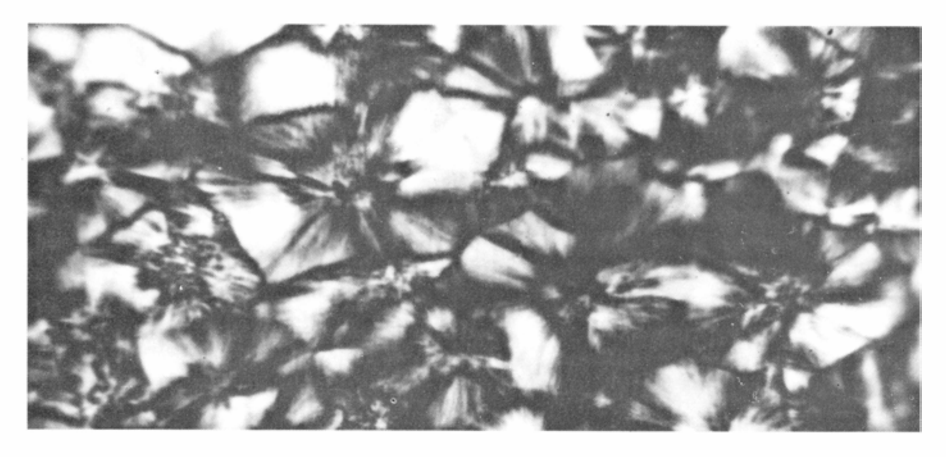
Tanto la forma de la molécula de polímero como su composición química condicionan las propiedades del material. En muchos polímeros, existen grupos laterales que cuelgan de los átomos de carbono, o de otro tipo, que integran la cadena principal. Los anillos aromáticos, o bencénicos, del poliestireno son un ejemplo de ello; en el polipropileno encontramos colgando un grupo metilo (un carbono rodeado por tres hidrógenos) de uno de cada dos átomos de carbono de la cadena. Hace unos 30 años, los investigadores descubrieron que, por medio de ciertos catalizadores especiales, los monómeros de propileno podían ensamblarse de forma que los grupos metilo se dispusieran regularmente alrededor de la cadena de polipropileno; todos ellos podían situarse a un mismo lado de ésta o podían alternarse en ambos lados. Tal regularidad recibe el nombre de tacticidad.

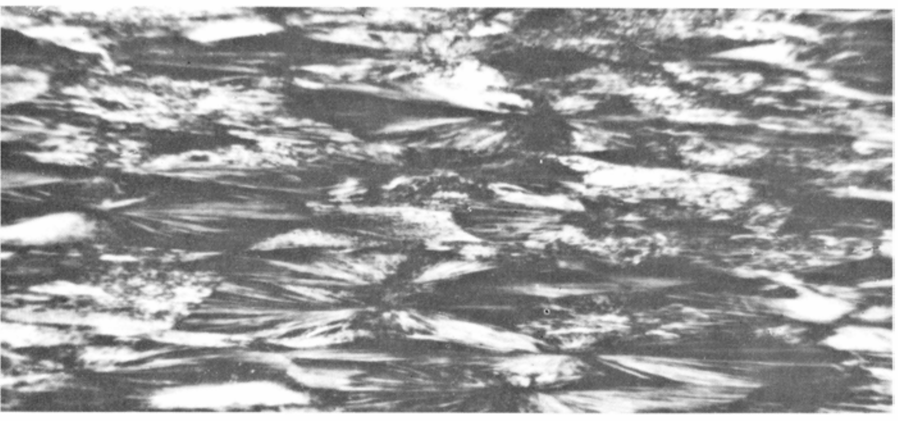
La tacticidad determina el empaquetamiento a largo alcance de las cadenas de los polímeros que tienen grupos laterales. Un polímero atáctico, como el poliestireno, cuyos grupos bencénicos se sitúan aleatoriamente a ambos lados de la cadena, es amorfo, es decir, sus moléculas se enredan con libertad y no presentan un orden a largo alcance. En un polímero táctico, por el contrario, la regularidad de los grupos laterales permite una disposición compacta de las cadenas, dando lugar a regiones con ensamblaje cristalino complejo en un empaquetamiento denso y regular. Este carácter parcialmente cristalino, que se presenta en numerosos polímeros sin grupos laterales voluminosos, lleva consigo, por lo general, un aumento de la densidad y rigidez del material, así como de su resistencia a los disolventes y a la temperatura. Así, mientras la variedad atáctica del polipropileno es un líquido altamente viscoso a temperatura ambiente, el polipropileno semicristalino, el polímero táctico más común con usos comerciales, es denso y rígido, funde a 165 grados C y se encuentra a menudo en productos plásticos resistentes al calor.

Puesto que las cadenas son flexibles por naturaleza, sólo la cristalización puede conferir rigidez a un polímero como el polipropileno si no se refuerza con otro material. En la cadena principal del polipropileno, igual que en la de muchos otros polímeros, los átomos adyacentes están unidos por un enlace covalente sencillo. Como ocurre con las uniones entre los vagones de un tren, el enlace sencillo permite la rotación, de manera que la cadena puede plegarse, enrollarse y retorcerse. En años recientes, los químicos de polímeros han introducido diseños moleculares en los que la cadena es inherentemente más rígida y estirada. Cuando los grupos aromáticos se incorporan en la propia cadena principal, le confieren rigidez, pues contienen dobles enlaces que son resistentes a la flexión y que, además, transmiten el carácter de doble enlace a los enlaces sen-



4. MICROESTRUCTURA DE UN POLIMERO SEMICRISTALINO. Ejemplificada en el caso del polietileno, se muestra aquí en tres niveles de detalle. Bajo luz polarizada, se observa que tales polímeros suelen hallarse constituidos por esferulitas densamente empaquetadas. Estas estructuras, en forma de soles, aparecen al solidificarse el polímero e iniciarse un crecimiento radial hacia fuera de los cristales que tiene su centro en los puntos de nucleación. Los esferulitas alcanzan diámetros de entre decenas y cientos de micrometros (millonésimas de metro). A escala más fina, cada esferulita es un ensamblaje radial de láminas cristalinas delgadas y orientadas en muchos planos diferentes. Dentro de cada lamela, o lámina, las cadenas de polímero se encuentran estrechamente empaquetadas y plegadas hacia arriba y abajo entre sus dos caras. La fase amorfa, en que las moléculas están desordenadas y enredadas, llena los espacios entre lamelas.





5. LA DEFORMACION DEL POLIPROPILENO transforma su microestructura. Una microfotografía tomada con luz polarizada muestra las esferulitas empaquetadas en una muestra de polímero sin deformar (*arriba*). Después de comprimir el material en una dimensión y estirarlo simultáneamente hasta unas dos veces y media su tamaño original en las otras dos, las esferulitas se aplanan, tomando forma de disco (*abajo*). El análisis de rayos X muestra que las lamelas que integran las esferulitas han girado en el plano de la lámina y se han fragmentado en bloques cristalinos que quedan conectados por un entramado de moléculas amorfas. En comparación con el mismo espesor de polímero sin deformar, la estructura planar de los bloques y la presencia de moléculas de enlace orientadas según los ejes de estiramiento explica la tenacidad y resistencia a la tracción, mucho mayores, que presenta la lámina deformada. Este trabajo se realizó en el laboratorio del autor, Case Center for Applied Polymer Research, en colaboración con la Bethlehem Steel Corporation.

cillos adyacentes, mediante un fenómeno conocido por resonancia. Si se sitúan suficientes grupos aromáticos en la cadena, la molécula viene a ser como una varilla rígida.

El diseño de un polímero de cadena aromática conlleva un doble efecto beneficioso. La rigidez de las moléculas componentes dotará, a su vez, de rigidez al material polimérico y facilitará, por otra parte, que las cadenas queden alineadas bajo ciertas condiciones. Concretamente, ciertos polímeros con forma de varilla rígida son cristales líquidos tanto en disolución como en el material fundido; las macromoléculas se alinean espontáneamente, como troncos en un curso fluvial estrecho, formando regiones donde la mayoría de ellas están orientadas en una dirección, o quizás en dos. La extensión de las regiones dotadas de un orden cristalino puede incrementarse bajo determinadas condiciones de flujo, como las que se dan a través de una boquilla de extrusión. Es, por tanto, fácil hilar un líquido cristalino en fibra, de forma que muchas de las cadenas de polímero queden orientadas a lo largo de su eje.

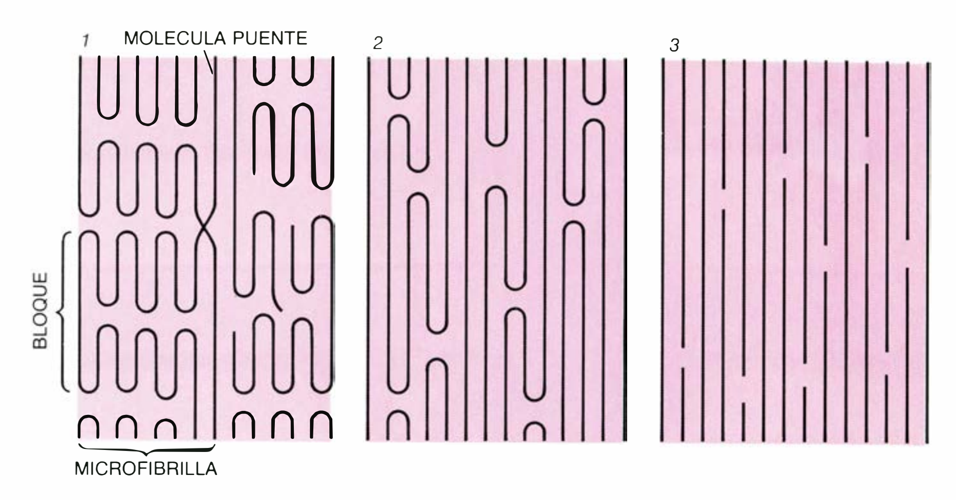
Cuando se tensa una de tales fibras, las uniones que se someten a esfuerzo no son débiles atracciones intermoleculares, sino enlaces covalentes carbono-carbono, los mismos que confieren al diamante su dureza. Las fibras de aramida, fibras comerciales hiladas a partir de una fase de cristal líquido, oponen una resistencia a la tracción comparable a la del acero. Los cristales líquidos poliméricos se benefician también del alineamiento de las cadenas cuando se hallan en estado sólido. Las regiones orientadas que se han formado en la fase líquida actúan, entonces, como elementos reforzantes, incrementando en gran medida la rigidez del material. Tales polímeros presentan puntos de reblandecimiento relativamente altos y una gran resistencia a la mayoría de los disolventes.

Ciertos polímeros en fase de desarrollo experimental, con un diseño muy diferente, exhiben también carácter de cristal líquido. En tales polímeros, la cadena principal es flexible, pero dispone de largos grupos laterales que contienen grupos aromáticos. Las cadenas laterales actúan como barras rígidas que se intercalan para formar regiones orientadas, mientras que las cadenas principales hacen de interconexión flexible entre dichas barras.

Variando las características de las cadenas de un polímero, podemos for-

zarlas a adoptar una microestructura que sea amorfa o semicristalina, uniforme o interrumpida por regiones de diferente composición u orientación molecular. A los científicos e ingenieros de polímeros no les basta con limitarse a fabricar moléculas que se ensamblen espontáneamente en una microestructura favorable. En muchos de los esfuerzos por mejorar un polímero, la molécula sintetizada constituye sólo el punto de partida; el polímero deberá someterse luego a un procesado que modifique convenientemente su estructura y propiedades.

Un tipo de proceso actualmente en boga es el mezclado ("blending"), un método que se aplicó primero a los polímeros amorfos, como el poliestireno, el policloruro de vinilo y el polimetacrilato de metilo. Como no son cristalinos, estos polímeros carecen de punto de fusión; ahora bien, por encima de una temperatura crítica, conocida como temperatura de transición vítrea, se tornan blandos y flexibles. Los polímeros amorfos sólo son útiles a temperaturas inferiores a la temperatura vítrea, estando entonces inmovilizada la estructura molecular y comportándose el material como un vidrio. La mayoría de los polímeros amorfos son frágiles por debajo de su temperatura vítrea, si bien hay notables excepciones según nos recuerda el policarbonato, un material resistente utilizado para cascos protectores.



6. ALINEAMIENTO DE LAS CADENAS POLIMERICAS. Confiere resistencia a la tracción a las fibras que se preparan a partir de un polímero semicristalino. Durante el estiramiento inicial, las lamelas cristalinas del polímero se rompen en bloques más pequeños de cadenas plegadas; éstos se alinean de un extremo a otro y dan lugar a numerosas microfibrillas distintas (*1*). Los bloques están conectados por moléculas de enlace extendidas que refuerzan las microfibrillas. Un estiramiento más extenso del polímero despliega parcialmente los bloques y provoca la fusión de las microfibrillas (*2*). El número mayor de moléculas que quedan ahora extendidas a lo largo del eje de la fibra le confieren una resistencia todavía mayor. En una morfología ideal, todas las cadenas de polímero quedarían estiradas a lo largo del eje de la fibra (*3*), beneficiándose ésta plenamente de la gran resistencia longitudinal que caracteriza a las macromoléculas de polímero.

Incrementaremos la tenacidad de un plástico amorfo y frágil si lo mezclamos con otro polímero, usualmente un elastómero. La mayoría de las mezclas ("blends") combinan componentes inmiscibles; de esta forma, el material que resulta contiene minúsculas partículas de uno de los polímeros dispersas en una matriz del otro. Controlando el proceso de mezclado y su enfriamiento, se llega a una mezcla en la que la concentración y rango de tamaños de las partículas sean óptimos. Si combinamos un plástico vítreo en una proporción relativamente baja de elastómero, las partículas de éste refuerzan el material, permitiendo una absorción más eficiente de la energía cuando se fractura. Su resistencia a la propagación de grietas aumenta sustancialmente.

Se acaba de desarrollar una nueva clase de mezclas incompatibles, las llamadas mezclas de altas prestaciones; incorporan éstas varios componentes en cantidades más o menos iguales. Muchas veces no se trata tanto de mitigar la fragilidad, cuanto mejorar otras cualidades. Un ejemplo prometedor combina policarbonato con poli (tereftalato de butilenglicol). Como ninguno de ambos polímeros es el componente dominante, las dos fases coexisten interpenetradas en una intrincada red. La resistencia de la mezcla al calor y a los disolventes es más alta que la del policarbonato puro, y su durabilidad la convierte en candidato para reemplazar a los metales en los parachoques de automóvil y otros componentes.

Se han desarrollado también algunas aleaciones o mezclas compatibles; la más conocida es la de poliestireno y otro polímero amorfo, el polióxido de fenileno (PPO). Los dos polímeros pueden mezclarse a nivel molecular para formar una disolución sólida que, en proporciones aproximadamente iguales, genera un material dúctil. Cuando el poliestireno puro se resquebraja por una tensión mecánica, se origina una red de microgrietas que implica a una deformación bastante frágil. En cambio, la aleación se deforma dúctilmente desarrollando bandas de cizalla, es decir, zonas que forman un ángulo de unos 45 grados con la dirección de la tensión, y en las que el material se encuentra estirado y es más delgado. Parece ser que el comportamiento dúctil de la mezcla poliestireno/PPO proviene de la gran afinidad existente entre las moléculas de ambos polímeros; este mismo factor justifica también su miscibilidad.

A diferencia de los polímeros amorfos, los polímeros semicristalinos distínguense por su tenacidad intrínseca. Al consistir en regiones cristalinas intercaladas con material amorfo, se caracterizan por tener una temperatura de transición vítrea, que es propia de la fase amorfa, y un punto de fusión, en el que las regiones cristalinas se vuelven fluidas. La mayoría de los materiales semicristalinos de uso común alcanzan temperaturas de transición vítrea por debajo de la temperatura ambiente; la del polietileno es de −110 grados C y la del nylon es aproximadamente de cero grados. Si el nylon se somete a un secado drástico, su temperatura de transición vítrea es más alta, pero tiende a absorber espontáneamente moléculas de agua que actúan como agente plastificante que lubrica las cadenas de la fase amorfa y hace bajar dicha temperatura. La naturaleza elástica de la fase amorfa confiere tenacidad al nylon y a otros polímeros semicristalinos.

Sin embargo, se ha observado recientemente que mezclando un polímero semicristalino con un elastómero se consigue un incremento de la tenacidad todavía mayor. La dispersión eficiente de inclusiones esféricas de elastómero en una matriz de nylon, polipropileno o polióxido de metileno produce mezclas llamadas supertenaces que suelen destinarse a aplicaciones de ingeniería.

El tipo más reciente de mezclas se asemeja a materiales híbridos ("composites") reforzados con fibras; en ellos se combina un polímero de cadena flexible, verbigracia, el nylon, con un polímero de cadena rígida. El componente rígido, disperso en la matriz del polímero flexible, actúa de fibra de refuerzo molecular. Tales "híbridos mo-



leculares" exhiben gran rigidez y resistencia al calor y a los agentes químicos, características éstas que les hacen apropiados como sustitutos del metal en ciertos componentes de maquinaria y estructuras aeronáuticas.

Mientras que el mezclado permite combinar las propiedades ventajosas de diversos polímeros, otros métodos de procesado pueden incrementar la resistencia de un solo polímero. Para que un material se beneficie plenamente de la resistencia longitudinal que poseen las moléculas poliméricas, éstas deben gozar de una orientación única. Si bien muchos polímeros de cadena rígida se orientan fácilmente, es también posible alinear las cadenas de un polímero convencional de cadena flexible mediante un procesado adecuado. El producto suele ser una fibra en la que muchas de las cadenas de polímero, que normalmente se encontrarían plegadas o arrolladas, están ahora extendidas a lo largo del eje de la fibra, confiriéndole gran resistencia y rigidez.

Las fibras orientadas obtenidas con polímeros semicristalinos como el nylon constituyen los pilares de la industria de las fibras sintéticas. Se han obtenido, recientemente, fibras aún más tenaces y con un grado más alto de orientación a partir de otros polímeros semicristalinos, entre los que destaca el polietileno. Para entender cómo el polietileno, el plástico blando de las botellas flexibles, puede transformarse, sin alteración química, en fibras con una resistencia a la tracción mayor que la de un peso equivalente de acero, se hace preciso conocer los cambios que acontecen en su microestructura. Como la de la mayoría de los polímeros semicristalinos, la microestructura del polietileno está dominada por las es-

7. SINERGIA DE PROPIEDADES en una lámina constituida por capas alternadas de dos polímeros diferentes. Dedúcese de la respuesta que presenta ante la fractura (la zona oscura que se extiende desde la parte superior de la imagen). Las capas miden 10 micrometros de espesor; las más oscuras corresponden al copolímero estireno-acrilonitrilo, un material rígido y relativamente frágil, en tanto que las más claras son de policarbonato, tenaz y dúctil. Las capas frágiles se resquebrajan fácilmente, formando microgrietas que facilitan el crecimiento de la fractura, mientras que las regiones dúctiles desarrollan bandas de cizalla. Estas regiones de deformación dúctil se aprecian en la microfotografía, tomada con luz polarizada, como bandas coloreadas. La formación de las bandas de cizalla absorbe energía, mellando la punta de fractura y deteniéndola finalmente. Es de esta manera como la lámina queda robustecida por las capas de policarbonato, mientras que son las capas del copolímero estireno-acrilonitrilo las que le dan rigidez. La lámina es un producto de la empresa Dow Chemical y la imagen se obtuvo en el laboratorio del autor, en colaboración con Dow.

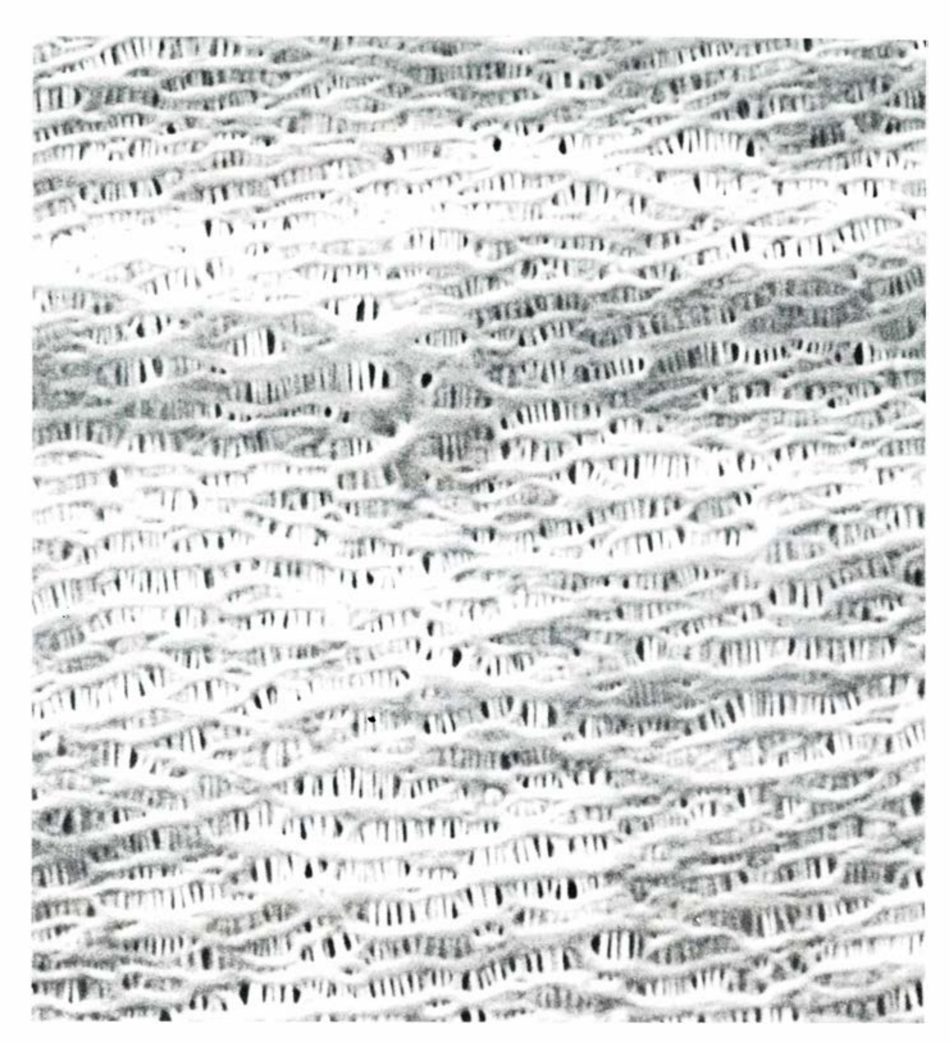
ferulitas. Estas estructuras cristalinas, similares a soles radiantes, están formados por láminas cristalinas que irradian de un centro común. Dentro de cada lamela, o lámina, las cadenas poliméricas se pliegan hacia abajo y hacia arriba entre dos planos. Llenando los espacios existentes entre las lamelas se encuentran las regiones amorfas.

Cuando un polímero semicristalino se estira en una fibrilla, las esferulitas se separan y las lamelas se desintegran en pequeños fragmentos de cadenas plegadas. Los principales elementos estructurales de las fibrillas son las microfibrillas, en las que los bloques cristalinos están alineados uno detrás de otro. Estos bloques, aunque separados por regiones menos ordenadas, quedan engarzados por moléculas de unión que hacen de puente entre unos y otros.

Se acaba de descubrir que ciertas condiciones de procesado aumentan el grado de extensión y orientación de las macromoléculas. La extrusión, o estiramiento lento y extensivo a una temperatura cercana al punto de fusión del polímero es una vía para conseguir dicha orientación. Otra estrategia consiste en tratar el polímero con un disolvente para formar un gel, que posteriormente se hila en fibras orientadas. En el gel, la red de macromoléculas que constituye el material está expandida, con lo que disminuye su resistencia al hilado.

También es posible orientar un polímero semicristalino en dos dimensiones, en vez de una, obteniéndose una lámina o película de polímero con mayor resistencia y tenacidad. Laminando el polímero en direcciones perpendiculares alternantes, puede producirse la deformación requerida. Otra estrategia recurre a la extrusión en estado sólido, mediante la cual un tubo de material polimérico se fuerza a través de una boquilla que, al mismo tiempo que expande el tubo, comprime sus paredes, deformándolo longitudinal y circularmente. En el caso del polipropileno, la lámina que resulta cuando se corta y se extiende el cilindro expandido triplica aproximadamente la resistencia a la tracción y multiplica por nueve la tenacidad de la lámina del polímero sin orientar.

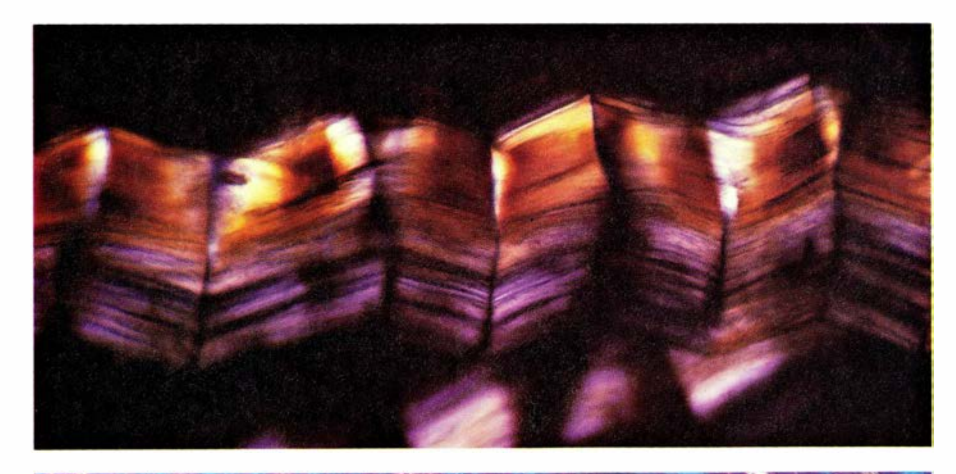
En el Centro de Investigación Aplicada de Polímeros de la Universidad Case Western Reserve, el autor y sus colegas han analizado los cambios microestructurales relacionados con el aumento de resistencia y tenacidad. Con un microscopio óptico, se han seguido los cambios que tienen lugar en la forma de las esferulitas cristalinas cuando el polipropileno se deforma en dos dimensiones. Los diagramas de difracción de rayos X han permitido seguir el rastro de los cambios concomitantes a la orientación molecular. Se ha encontrado que, cuando las esferulitas se aplanan, las lamelas cristalinas giran en el plano de la lámina y se rompen en bloques cristalinos menores, los cuales, en la lámina completamente deformada, quedan entretejidos en una tela amorfa de cadenas de polímero que se orientan según las direcciones de deformación. La estructura orientada de cristalitos y moléculas enlazantes robustece la lámina deformada.

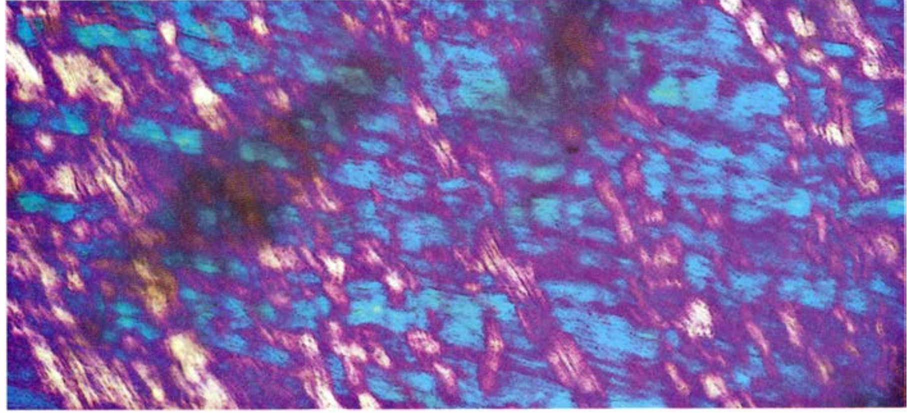


8. ESTA MEMBRANA MICROPOROSA se preparó estirando repetidamente una película de polipropileno a temperaturas altas y bajas. El proceso ha originado en la película diminutas grietas paralelas, delimitadas por microfibras que definen un tamaño promedio de poro de varios cientos de angstrom (un angstrom equivale a 10^{-10} metros). Dado que el polipropileno repele el agua, este tipo de membrana es impermeable al agua, pero no a los gases ni a otras sustancias diversas, cualidades éstas que la hacen útil para instrumentos de oxigenación de la sangre y para sistemas de dosificación controlada de fármacos. Si la membrana se trata químicamente para que pueda humedecerse, puede servir también de microfiltro capaz de separar del agua microorganismos tales como las bacterias. La microfotografía electrónica de rastreo muestra el material Celgard, de la Celanese Corporation, y ha sido proporcionada por Celanese Separations Products.

Los avances recientes en el procesado de polímeros han posibilitado la fabricación de estructuras con una relación menos estrecha con las propiedades moleculares que las discutidas hasta este momento. Por ejemplo, en vez de mezclar varios polímeros, se realiza con ellos una extrusión simultánea para originar una estructura compuesta de capas alternadas de diferentes polímeros, cada capa con unos 10 micrometros de espesor. El grosor del material fabricado puede incluir cientos o miles de capas; y si un componente es rígido pero frágil y el otro elástico, su comportamiento global será, a la vez, rígido y tenaz.

Tal tipo de estructura impuesta resulta decisiva para las prestaciones de las membranas poliméricas, un tipo de material que ha originado nuevos procesos industriales, nuevos instrumentos médicos y nuevos artículos de consumo. Algunas membranas son microporosas, agujereadas con orificios de un tamaño mínimo, hasta el punto de evitar el paso de una bacteria. Estos agujeros suelen ser "microfisuras", esto es, pequeñas grietas producidas en





9. LOS POLIMEROS BIOLOGICOS poseen una arquitectura que está adaptada con precisión a los esfuerzos que han de soportar. La resistencia longitudinal del tendón es fruto del empaquetamiento de las fibrillas del polímero colágeno, orientadas según el eje del tendón (*arriba*). La luz polarizada revela la ondulación de las fibrillas que las hace elásticas. La pared del intestino está también reforzada por fibras onduladas de colágeno, organizadas en grupos que se entretejen (*abajo*). Cada grupo de fibrillas paralelas forma un ángulo de unos 30 grados con el eje mayor del intestino (en esta fotografía, dicho eje coincide con la diagonal que va desde el extremo superior izquierdo al inferior derecho). Esta disposición ordenada permite combinar el refuerzo con una adecuada elasticidad. Cuando la pared del intestino se estira, las fibrillas pierden su ondulación y los ángulos cambian. En último extremo, la red de colágeno se hace inextensible, protegiendo al intestino de la ruptura. Las microfotografías se deben al autor y a sus colaboradores.

la película de plástico al aplicar una tensión. Algunas membranas de este tipo se usan para microfiltración. Otras, al estar fabricadas de un polímero hidrofóbico (repelente del agua), permiten el paso de ciertos líquidos y gases, pero no de agua ni de disoluciones acuosas; estas membranas han encontrado aplicaciones en ropas impermeables y transpirables, dispositivos para oxigenación de la sangre y sistemas dosificadores de fármacos.

La mayoría de las membranas no son, sin embargo, porosas: la dinámica molecular controla la permeabilidad. La estructura electrónica del polímero puede favorecer el paso de determinados iones, haciéndolo adecuado para electrodiálisis (uso de un campo eléctrico para extraer iones a través de una membrana). Existen también otras membranas que sólo son permeables al agua o a determinados gases. En los usos a que se destinan –desalinización del agua de mar por ósmosis inversa, o aislamiento del oxígeno del aire–, tales membranas deben, a menudo, resistir altas presiones del flujo de líquido o gas. Al mismo tiempo, la membrana ha de ser lo suficientemente delgada como para tener la permeabilidad adecuada. Por tales razones, es necesario disponer de un soporte mecánico, y esto se resuelve fabricando la membrana como una capa delgada y continua de polímero adosada a una subestructura porosa más gruesa. Dicha subestructura suele estar, a su vez, reforzada por una capa de tela sintética.

Muchos de los avances registrados en la síntesis y transformación de los polímeros tienen como objetivo mejorar sus prestaciones bajo condiciones de tensión mecánica y en entornos químicos y térmicos diversos. Los investigadores de polímeros se afanan ahora por obtener materiales que satisfagan otros tipos de aplicación, usando el carácter eléctrico que tienen las macromoléculas. Dada la naturaleza aislante de la mayoría de los polímeros, se han utilizado tradicionalmente como materiales aislantes o de soporte en electrónica. Más recientemente, han asumido nuevas funciones, destacando las relativas al aprovechamiento de su resistencia a la luz o a los haces de electrones, sirviendo de materiales enmascarantes sobre los que se trazan los circuitos impresos mediante haces de luz, radiación o electrones durante la fabricación de las micropastillas ("microchips"). En la actualidad parece que ciertos polímeros, si se modifican apropiadamente, podrían desempeñar un papel activo como conductores en sistemas electrónicos.

La conductividad eléctrica de un material refleja su estructura electrónica. Los electrones que rodean a un átomo ocupan orbitales específicos, caracterizados por niveles discretos de energía. Cuando los orbitales de muchos átomos se solapan en un sólido, los electrones se deslocalizan y dejan de pertenecer a un átomo en particular. Al mismo tiempo, los niveles discretos de energía se ensanchan en bandas permitidas de energía, cada una de las cuales es capaz de acomodar un número específico de electrones. Si la banda ocupada de mayor energía del sólido sólo está parcialmente llena, el material será conductor, pero si está completamente ocupada será un semiconductor o un aislante.

En los polímeros en los que los pares de átomos de carbono adyacentes están unidos por dobles enlaces, los orbitales se solapan a lo largo de la cadena de polímero y los estados energéticos se transforman en bandas. La banda ocupada de mayor energía está llena y los electrones deberán trasladarse a la banda energética vacante superior para conferir a la molécula de polímero conductividad sobre su eje.

La conductividad de tales polímeros puede incrementarse ampliamente mediante dopado (adición de determinadas impurezas). Se cree que la impureza actúa restando o añadiendo electrones a las cadenas poliméricas; es decir, la banda energética llena pierde electrones o la banda vacía inmediatamente superior los gana. De esta manera, el material consigue la banda energética parcialmente ocupada que se necesita para la conducción. La conductividad del poliacetileno, uno de los primeros polímeros conductores desarrollados, puede elevarse diez órdenes de magnitud mediante dopado con pentafluoruro de arsénico, alcanzando

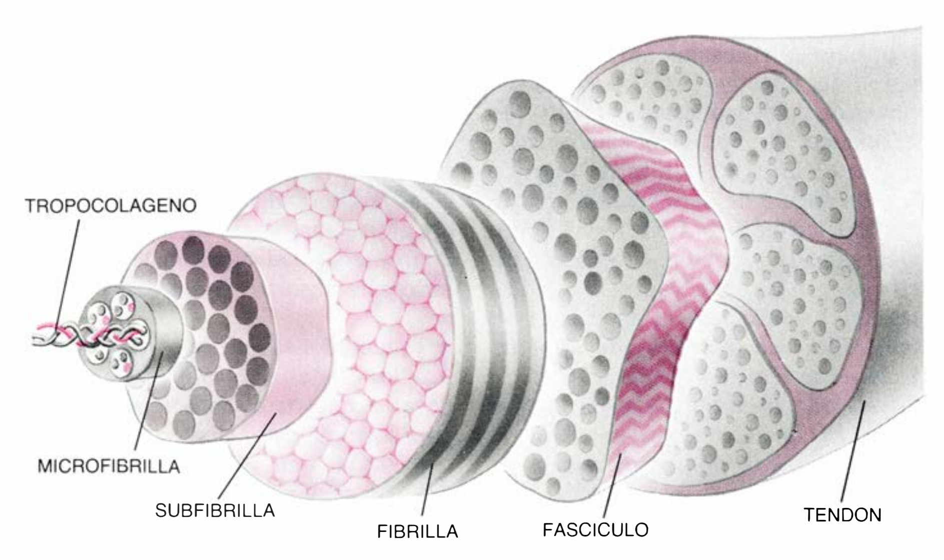
el nivel de conducción de determinados metales.

La teoría de la conductividad en los polímeros no está plenamente desarrollada, lo que explica la persistencia de barreras prácticas para el uso rutinario de estos materiales. Muchos polímeros que pueden volverse conductores tienen cadenas principales de naturaleza aromática, ya que estos grupos contienen dobles enlaces y se caracterizan por presentar orbitales deslocalizados. Estos polímeros rígidos y conductores, difíciles de procesar, resisten al calor y a los disolventes y son además bastante frágiles. En un esfuerzo por reducir estos inconvenientes, Mark Druy, Michael Rubner y Sukant Tripathy, de los Laboratorios GTE, han mezclado polímeros conductores con elastómeros, para darles resistencia y facilitar su reblandecimiento y moldeo.

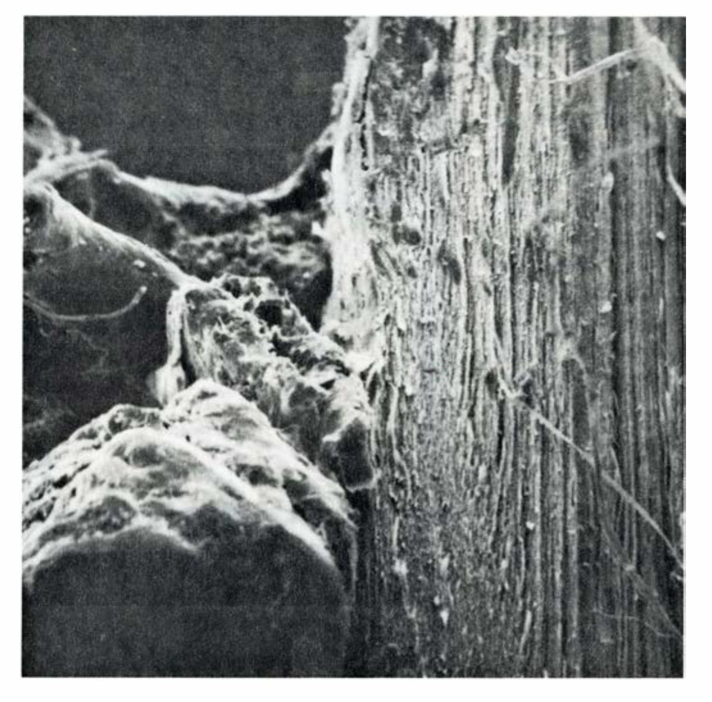
Ciertos polímeros pueden manipularse para mostrar otro tipo de comportamiento que también involucra su estructura electrónica. La luz está asociada a un campo eléctrico oscilante que interacciona con la estructura electrónica de la materia. En respuesta al campo eléctrico de una luz muy intensa, cambian las propiedades ópticas de ciertos materiales. Este comportamiento óptico no lineal puede manifestarse como un cambio en la absorción óptica o en el índice de refracción. El desarrollo de materiales con respuesta no lineal elevada podría abrir el camino a un ordenador o un sistema de comunicaciones totalmente ópticos, en los cuales la luz controlara la propagación de otros haces luminosos, de la misma manera que las corrientes de electrones se controlan unas a otras en microelectrónica.

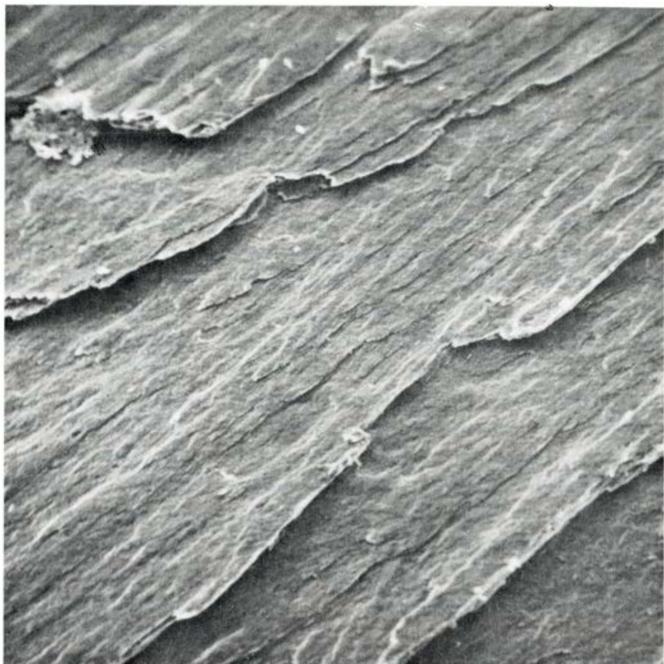
Recientemente, se ha visto que ciertos polímeros semiconductores –los polidiacetilenos– presentan desviaciones extremadamente grandes del comportamiento óptico lineal. Anthony F. Garito, de la Universidad de Pennsylvania, y Alan Buckley, de la Celanese Research Company, han descubierto también desviaciones drásticas de la linealidad óptica en ciertos polímeros rígidos como el poli(parafenilenbenzobisimidazol) (PBI). Se cree que este comportamiento refleja el solapamiento de orbitales a lo largo del eje del polímero. Cuando una luz intensa con una determinada longitud de onda incide en la molécula con un ángulo específico, excita los electrones deslocalizados de tal forma que su respuesta a un segundo haz luminoso queda alterada. Esta respuesta modificada se manifiesta en un cambio momentáneo del índice de refracción del material. En un instrumento práctico que se basara en este efecto, el material no lineal tendría que estar libre de defectos que dispersaran la luz. Con este fin, Mrinal Thakur, de los Laboratorios GTE, ha conseguido desarrollar películas monocristalinas de polidiacetileno próximas a la perfección óptica.

A pesar de su probada versatilidad, los polímeros se siguen empleando, sobre todo, como materiales estructurales, para sacarle partido a sus propiedades mecánicas, claramente su-



10. JERARQUIA de las unidades estructurales del tendón. Empieza en el tropocolágeno, una triple hélice de cadenas poliméricas de proteína, y se organiza a través de microfibrillas, subfibrillas, fibrillas (onduladas cuando no están bajo tensión) y fascículos, hasta llegar al tendón mismo. La organización jerárquica del tendón es la razón de su tenacidad. Cuando el tendón se somete a una tensión excesiva, las unidades estructurales pueden fallar por separado, absorbiendo localmente energía y evitando la rotura de aquél.





11. EL POLIMERO CON CARACTER DE CRISTAL LIQUIDO, conocido como Vectra, asume espontáneamente una complicada morfología cuando se inyecta en un molde. Una microfotografía electrónica de rastreo (*izquierda*), tomada después de romper la muestra, una vez solidificada, revela sus dos características más notables: una cubierta externa estratificada, consistente en fibras y placas alineadas en una única dirección, y un núcleo central de estructura menos ordenada. La cubierta se ha originado a partir del flujo del polímero fundido sobre las paredes del molde, flujo que hace que las moléculas de cadena rígida (características de un polímero con carácter de cristal líquido) se orienten en la dirección de la corriente. La orientación de las moléculas se detecta en una microfotografía electrónica de rastreo que muestra una superficie de fractura de dicha cubierta (*derecha*), revelando una textura muy parecida a la de la madera. El polímero moldeado por inyección es rígido a lo largo del eje de orientación molecular, así como la madera lo es, a su vez, a lo largo de su fibra.

periores. Dada la capacidad que tienen el procesado y la síntesis molecular para mejorar el comportamiento mecánico de los polímeros, los investigadores continuarán buscando nuevas vías, cada vez más favorables, para organizar las macromoléculas; como guía para ello, harían bien en fijar su atención en la biología.

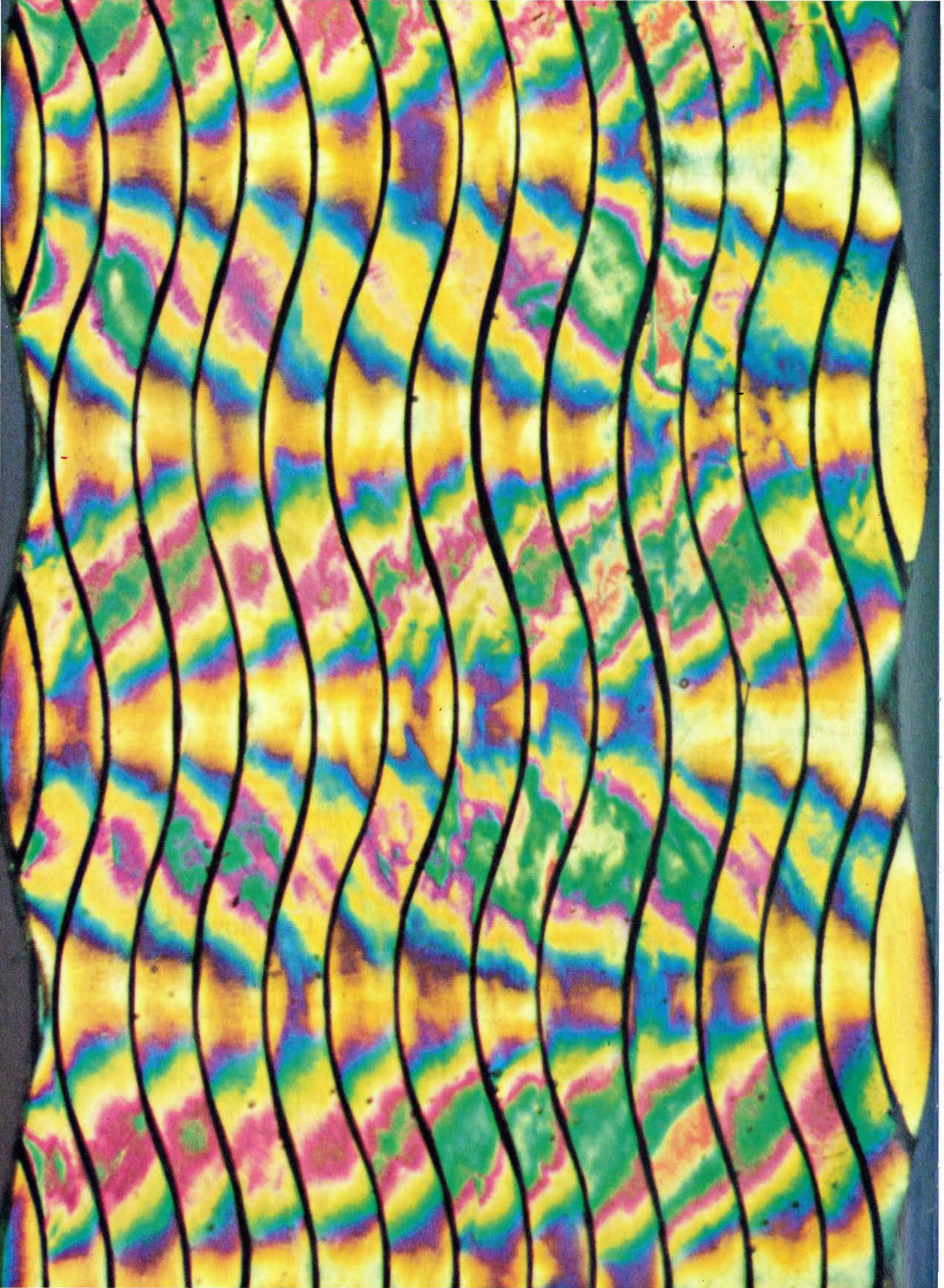
La arquitectura del tendón resulta instructiva. El tendón está constituido fundamentalmente por una proteína fibrosa, el colágeno, que es un polímero biológico, embebida en una matriz de naturaleza gelatinosa formada por otras sustancias. Su estructura jerárquica muestra seis niveles de organización diferentes; se resuelve en componentes cada vez más finos en fascículos, fibrillas, subfibrillas, microfibrillas y finalmente una macromolécula, el tropocolágeno, una hélice triple de cadenas de proteína. La arquitectura de tal estructura refleja las tensiones que ha de soportar: está orientada, en todos los niveles, según un eje único. Las fibrillas presentan una naturaleza rizada u ondulada que le comunica su elasticidad.

Además, la naturaleza jerárquica de la estructura le confiere tenacidad. Cuando el tendón está bajo una gran tensión, los pequeños elementos de la estructura fallan independientemente: las fibrillas individuales se rompen en subfibrillas y microfibrillas. El fallo local absorbe energía, evitando, de esta manera, el fallo catastrófico del sistema entero, a no ser que los daños sufridos sean enormes.

El mismo principio de organización jerárquica, específicamente adaptada a la tensión, aparece en muchos otros materiales biológicos. Por ejemplo, bajo su revestimiento mucoso, la pared del intestino está reforzada por fibras de colágeno rizadas. Dos series orientadas de fibras rodean oblicuamente el intestino, cruzadas entre sí con un ángulo de unos sesenta grados. La ondulación de la fibra y su disposición sesgada permiten al intestino dilatarse y volverse a contraer elásticamente. Las técnicas de la ciencia de materiales han revelado que otras relaciones similares y elegantes entre la estructura y las propiedades mecánicas se dan, también, en la pared de la aorta, los discos intervertebrales y los cartílagos de las articulaciones.

La ciencia de los polímeros está comenzando a imitar los principios de organización jerárquica por los que se rigen los tejidos biológicos. En muchos nuevos materiales compuestos de tipo polímero-matriz, las fibras reforzantes se acomodan según unos modelos de organización que prevén las tensiones que afrontará el material. Unos pocos polímeros sintéticos imitan incluso la capacidad de las macromoléculas biológicas de autoensamblarse en estructuras complejas. Los polímeros con propiedades de cristal líquido pueden adquirir espontáneamente una morfología compleja, dado que su orientación molecular surge en respuesta a la aparición de un flujo. Un ejemplo estudiado por el autor y sus colaboradores es el moldeado por inyección de una membrana ordenada en capas con un alto grado de orientación, parecida, pues, a la mica. La orientación molecular confiere rigidez al material y la estratificación, como la de la mica, le aporta tenacidad superficial, al capacitarle para absorber daños locales.

Es tentador sugerir que el estudio de los materiales biológicos podría llevar a nuevos diseños jerarquizados para los polímeros sintéticos. En todo caso, la biología ilustra las posibilidades que tiene el diseño de polímeros para la construcción de sistemas con aplicaciones particulares. No hay duda de que los polímeros necesarios para afrontar los desafíos del siglo XXI deberán concebirse, no como materiales monolíticos, sino como sistemas de materiales intrincadamente estructurados.



Materiales híbridos

La composición y estructura interna de los materiales híbridos puede modificarse a voluntad con el fin de adaptar sus prestaciones a las exigencias del usuario

Tsu-Wei Chou, Roy L. McCullough y R. Byron Pipes

Un avión capaz de despegar, atravesar la atmósfera y el espacio a velocidades hipersónicas y seguir incólume tras entrar de nuevo en la atmósfera para aterrizar en su destino como un avión convencional habría superado la prueba decisiva de la eficacia de sus materiales estructurales. Para colocarse en órbita con la sola ayuda de su reserva de carburante, el ingenio necesitaría una estructura construida, a la vez, de materiales livianos, rígidos y resistentes, capaces de soportar enormes tensiones aerodinámicas. Algunas partes de su estructura necesitarían mantener su resistencia a una temperatura superior a 1000 grados Celsius; los motores deberían soportar temperaturas aún mayores. Aunque se pretende llegar a construir un avión como el descrito, se ha avanzado muy poco en su diseño. No cabe duda, sin embargo, acerca del tipo de materiales que constituirían su estructura y determinados elementos de sus motores: los materiales híbridos ("composites").

El comportamiento que ese aparato exigiría a su estructura sería único, pero no nuevo del todo. La necesidad de conjugar rígidez y resistencia con baja densidad ya ha llevado a los ingenieros aeronáuticos, diseñadores de artículos deportivos e ingenieros de la automoción a recurrir a los materiales híbridos para algunos componentes. Ciertos materiales híbridos que cumplen con la exigencia adicional de resistencia a temperaturas elevadas se usan en algunos componentes de los motores de los cohetes y en los conos de proa de los misiles. Cuando el avance tecnológico plantea la necesidad de combinar propiedades que ningún material puede suministrar por sí sólo, la solución se encuentra muchas veces en un material híbrido. Al introducir fibras o partículas de una sustancia en una matriz que actúa de aglutinante, el diseñador de materiales híbridos puede conseguir propiedades que ninguno de los dos posee por separado.

A la vista de todo esto, podría parecer que los materiales híbridos revisten una complejidad desmesurada. La fabricación de materiales estructurales ideales parece hallarse a nuestro alcance, con algunos elementos concentrados en la sección central de la tabla periódica. Entre ellos, el carbono, aluminio, silicio, nitrógeno y oxígeno forman compuestos cuyos átomos están unidos por enlaces estables y fuertes. Gracias a eso, tales compuestos, representados por las cerámicas de óxido de aluminio (el principal componente del rubí y del zafiro), carburo de silicio y dióxido de silicio (un componente básico del vidrio), son fuertes, rígidos y resistentes al calor y al ataque químico. Sus densidades son bajas; sus elementos constituyentes, abundantes. El carbono presenta por sí solo estas excelentes propiedades en la forma de grafito.

Pero se trata de elementos con un grave inconveniente, que los ha mantenido apartados de las estructuras tradicionales: son frágiles. Un pequeño rasguño superficial o un defecto interno resulta suficiente para iniciar una rotura. Su fácil agrietamiento nos enseña que casi nunca alcanzan la resistencia que en teoría encierran: no es probable que el material antes de su empleo se halle libre de pequeños defectos, ni que tarden en presentarse con el uso real.

Cuando se produce este material en partículas o fibras finas (el caso más común), su resistencia útil se multiplica. Mientras que el vidrio normal carece de valor por su tendencia a resquebrajarse, un vidrio similiar tejido en forma de fibras finas opone una resistencia a la tracción de tres mil millones de pascales. (Un pascal equivale a la fuerza de un newton ejercida sobre un área de un metro cuadrado.) La resistencia a la tracción de un acero corriente, por poner una comparación, se cifra en 500 millones de pascales.

El notable aumento de resistencia a pequeñas escalas es, en parte, un fenómeno estadístico: la probabilidad de que una muestra de material contenga un defecto suficiente para provocar un resquebrajamiento disminuye a medida que mengua el tamaño de la muestra. Además, si se rompe una fibra de la agrupación, la grieta ya no se propaga y el resto de las fibras permanece intacto. Por el contrario, si se trata de una cantidad similar de material macizo la grieta inicial se expandirá hasta desencadenar la rotura total.

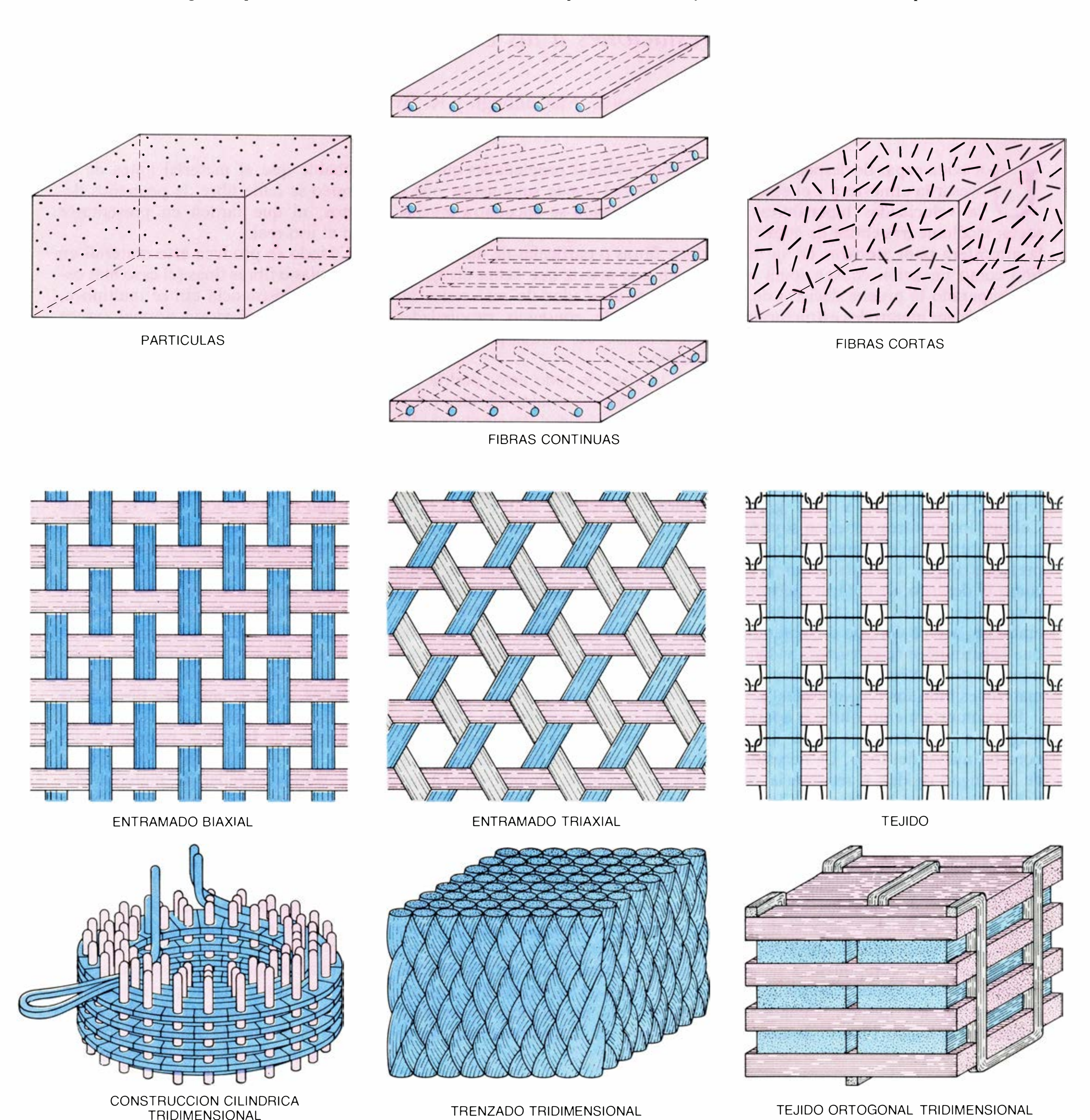
Los "pelos de bigote" son pequeñas estructuras aciculares fabricadas de carburo de silicio y óxido de aluminio; menos débiles, ofrecen una resistencia mayor que el material en bruto. Los pelos de bigote tienen una menor probabilidad de alojar defectos que el material en bruto, no sólo por razones estadísticas, sino también porque se fabrican en forma de monocristales que poseen una geometría teóricamente perfecta.

La idea de que muchos materiales se comportan mejor presentados en fibra vige también en ciertos polímeros orgánicos. Las moléculas de polímero están constituidas por una larga cadena de átomos, generalmente carbono, unidas por enlaces covalentes. En la ma-

1. TENSIONES que sufre un material híbrido flexible hecho de fibras onduladas de grafito incluidas en una matriz de resina, registradas en este tapiz cromático. La muestra se sometió a tensión y se fotografió con prismas cruzados polarizantes. La tensión modifica las propiedades ópticas de la matriz, dando lugar a diagramas cromáticos de interferencia al ser iluminada con luz polarizada. Como todos los materiales híbridos, las fibras y la matriz juntas muestran un comportamiento mecánico original. A tensiones no muy fuertes el híbrido se estira fácilmente; cuando las fibras se enderezan (deformando los bordes de la matriz en sierra) se torna mucho más rígido. El híbrido de esta ilustración no tiene uso práctico; se trata de un sistema experimental para examinar el efecto de las fibras onduladas en las propiedades de los materiales híbridos. La fotografía ha sido obtenida por uno de los autores (Tsu-Wei Chou) y varios colegas suyos.

yoría de los casos, las cadenas se hallan débilmente ligadas o cristalizadas según esquemas complejos. Si pueden separarse con cierta facilidad, el resultado es un material flexible y liviano. Pero si las cadenas están orientadas en la dirección de la tensión, el polímero puede resultar muy fuerte y rígido. Las móleculas de algunos polímeros, con forma de barra, se alinean fácilmente al hilar el polímero para obtener las fibras; la fabricación de fibras aramidas, notables por su resistencia y rigidez, se funda en este efecto. Polímeros con cadenas flexibles, como el polietileno, pueden convertirse también en fibras sumamente resistentes y rígidas por medio de técnicas que extienden y orientan las moléculas del polímero en la dirección del eje de la fibra.

Los materiales híbridos representan un punto de referencia para la elaboración de nuevos materiales aprovechando las ventajas de las fibras. El haz de fibras carece de gran valor estructural. Para sacarle partido a su re-



2. GEOMETRIAS REFORZANTES de los materiales híbridos, agrupadas a grandes rasgos por la forma de sus elementos reforzantes: partículas, fibras continuas y fibras cortas (*arriba*). Los grupos de fibras continuas paralelas se insertan en delgadas capas de material híbrido, con las cuales se forma después un laminado. En proceso alternativo, cada pliego de laminado puede reforzarse con fibras continuas entramadas o tejidas (*centro*) en una ''preforma'' textil que cubre el espesor entero y la longitud de la estructura acabada del híbrido. Algunas geometrías desarrolladas recientemente dejan de lado la laminación: las fibras se entrecruzan o entrelazan en tres dimensiones (*abajo*); ello, en algunos casos, permite obtener directamente la forma final del híbrido. Al elegir entre

sistencia, el diseñador de materiales híbridos las introduce en una matriz de otro material. La matriz actúa de conglomerante, uniendo las fibras y confiriendo solidez al material. También las protege de las tensiones del entorno y de daños físicos que pudieran provocar la aparición de grietas.

La resistencia y rigidez del material híbrido débense, en gran parte, al reforzante, si bien la matriz contribuye a definir otras propiedades. La conductividad térmica y eléctrica del material híbrido, por ejemplo, está estrechamente condicionada por la conductividad de la matriz. El comportamiento mecánico del material híbrido está regido no sólo por las fibras, sino también por un efecto sinergético entre fibras y matriz.

La resistencia del material híbrido frente a la tensión es resultado de un efecto sinergético (cooperativo). Cuando un haz de fibras sin una matriz circundante se somete a tensiones, la rotura de una de sus fibras la inutiliza para soportar cargas. La tensión que estuviera aguantando se transmite a las fibras intactas, acercándolas más a su límite de fractura. Si las fibras están incorporadas en una matriz, la rotura no acaba con la función mecánica de la fibra afectada.

La razón estriba en que los materiales que forman las matrices suelen ser dúctiles: elásticos o plásticos. Cuando los dos terminales rotos de la fibra se separan, la deformación elástica o el estiramiento plástico de la matriz soporta esfuerzos de cizalladura que poco a poco crean tensiones en los fragmentos. En virtud de esta transferencia de carga, la fibra rota continúa contribuyendo a la resistencia del material híbrido. La tensión en las fibras intactas de su entorno aumenta menos que si no existiera matriz y el material híbrido es capaz de soportar mayores tensiones sin romperse. El efecto sinergético de las fibras y la matriz puede reforzar, por tanto, el material híbrido y potenciar así su tenacidad, ya que se necesita más trabajo para producir la fractura.

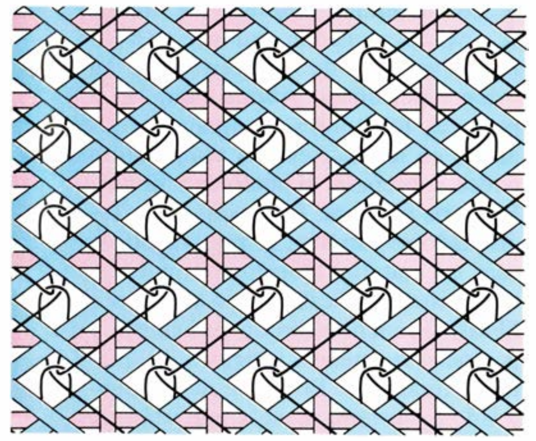
Si bien la ductilidad de la matriz constituye un criterio de elección del material componente, la constricción más fuerte la impone el intervalo de temperaturas a que el material híbrido va a estar sometido durante su uso. Los híbridos expuestos a temperaturas no superiores a 100–200 grados Celsius tienen generalmente un polímero como matriz. La mayor parte de los materiales híbridos corresponden a este grupo: la fibra de vidrio, por ejemplo, que fue uno de los primeros, consta de cortas fibras de vidrio embebidas en poliéster. Se emplea en utensilios, cascos de barco y carrocerías de coche, ya que no sólo reduce el peso de un componente, sino que también abarata su producción; pues en algunos casos, inyectando en un molde, una estructura compleja queda reducida a una sola pieza. Muchos de los materiales híbridos desarrollados para recubrimientos de avión y elementos estructurales llevan también fibras rígidas y consistentes: grafito o aramidas incluidos en un polímero, generalmente uno que ofrezca mayor resistencia a la temperatura que el poliéster.

Las matrices poliméricas son, con frecuencia, termoestables; lo que ocurre si existen enlaces entre las cadenas de polímero que bloqueen la estructura molecular para dar lugar a una red tridimensional rígida que no se pueda fundir. Los materiales termoestables resisten mucho mejor el calor que la mayoría de los termoplásticos, la otra clase de materiales poliméricos; éstos se funden cuando se calientan porque sus enlaces no cruzan las cadenas poliméricas. Las resinas epoxy son los integrantes de uso habitual en las matrices termoestables de los materiales híbridos de mejor comportamiento. Otra clase de resinas, las poliimidas, que soportan una exposición continua a temperaturas por encima de los 300 grados Celsius, está despertando un creciente interés.

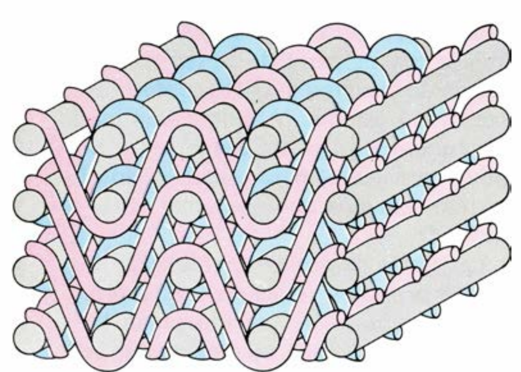
La elección de la matriz determina el proceso de elaboración del material híbrido. Al fabricar un híbrido de matriz polimérica, las fibras, normalmente en forma de hilos o haces, se incluyen en la resina matriz. Pueden así agruparse en cintas o láminas, que se ensamblarán a mano para formar una estructura laminada. Las fibras incluidas pueden también aplicarse directamente sobre un objeto por el proceso de "arrollamiento de filamento". La resina termoestable exige curación de la estructura: someterla a unas condiciones que permitan entrecruzarse a las cadenas del polímero. El híbrido debe soportar, a menudo, altas temperaturas y presiones durante muchas horas.

Para acortar el tiempo del proceso, se están desarrollando materiales de matriz termoplástica. Tenemos un ejemplo prometedor en el polímero polietilenetercetona (PEEC). Sintetizar un material híbrido de matriz termoplástica sólo exige una exposición relativamente corta a una temperatura suficiente para ablandar el plástico. La temperatura de fusión de algunas matrices termoplásticas es tan alta que rivalizan, en resistencia al calor, con los materiales termoestables: el PEEC, por ejemplo, funde a 334 grados C. Los termoplásticos gozan de una ventaja adicional: son más tenaces que la mayoría de los termoestables.

Las temperaturas de fusión o degradación de una matriz polimérica exigen otro tipo de material para la matriz; suele tratarse de un metal. Ade-

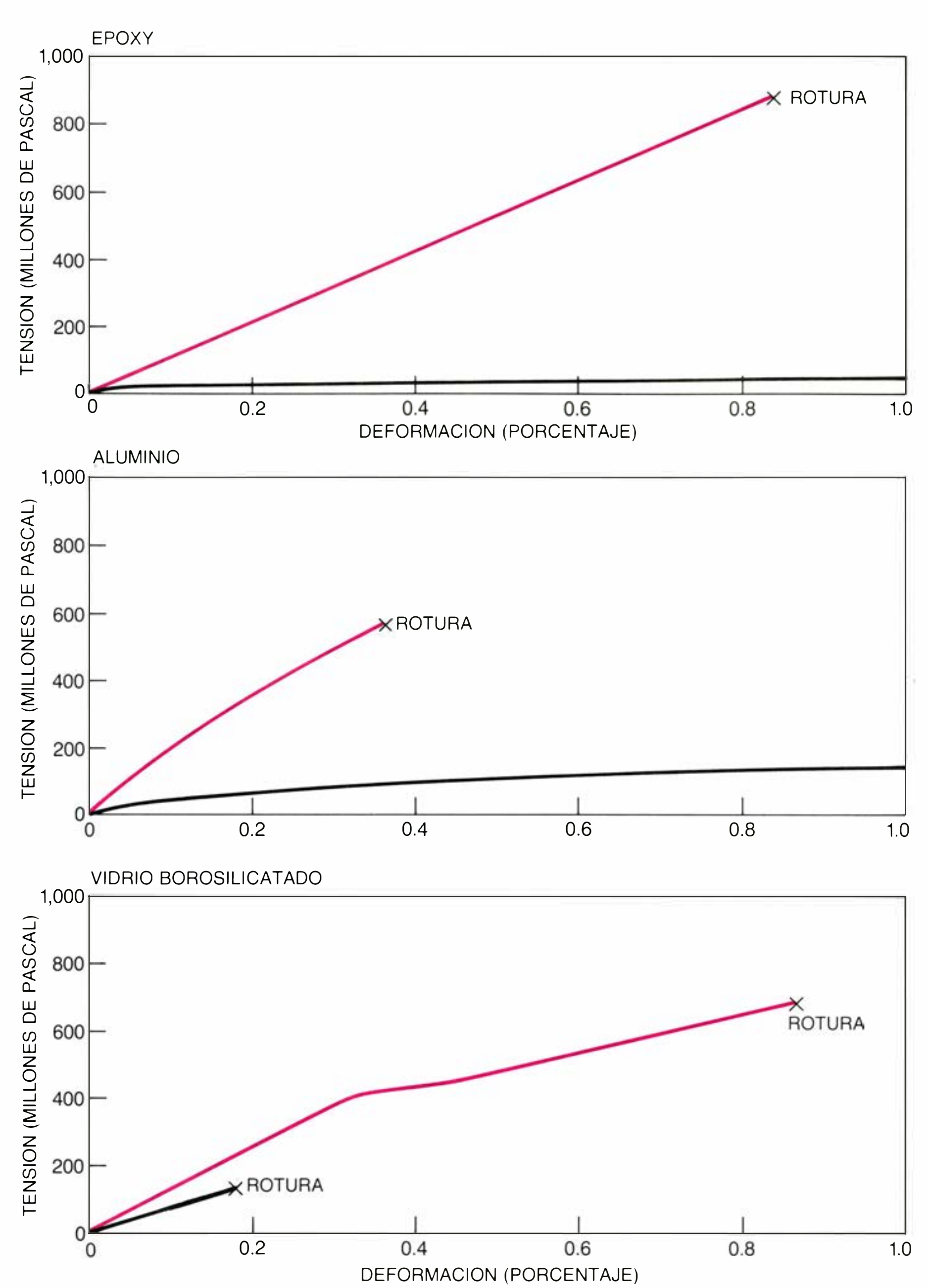


ENTRECRUZADO DE TRAMA MULTIAXIAL MULTICAPA



CONSTRUCCION ANGULAR BLOQUEADA

las diversas disposiciones, los ingenieros consideran el coste y las características mecánicas; por ejemplo, las direcciones para las que la disposición espacial suministra más resistencia. S. Fowser, A. P. Majidi, J.-M. Yang y F. Ko han aportado el material.



3. AUMENTO DE RIGIDEZ conseguido al entrelazar las fibras dentro de la matriz. Se hace evidente en cuanto comparamos las curvas que muestran la relación entre tensión y deformación para un material no reforzado (polímero, metal y cerámica) con las de los materiales híbridos correspondientes (*en color*). La tensión se mide aquí en pascales: una fuerza de un newton ejercida sobre un metro cuadrado del material. La deformación es la proporción en que el material sometido a tensión se alarga. Mientras que un epoxy (un polímero) sin reforzar se estira fácilmente, un material híbrido de matriz epoxy que contenga un 50 por ciento en volumen de fibras de carburo de silicio es mucho más rígido: su curva tensión–deformación adquiere una trayectoria más firme (*arriba*). En una matriz de aluminio, el mismo porcentaje en volumen de reforzante, en este caso fibras de óxido de aluminio, también mejora la rigidez (*centro*). (En razón de la fragilidad de las fibras, el híbrido se rompe ante una deformación mucho menor que el aluminio sin reforzar.) Una fracción similar de fibras de carburo de silicio confiere poca rigidez a una matriz de vidrio borosilicato, pero le proporciona tenacidad, aumentando el porcentaje que puede deformarse sin romperse (*abajo*). Las fibras son las causantes, ya que frenan el crecimiento de grietas en la matriz Karl M. Prewo, del U.T. Research Center, Ravindranath Shetty, de Zimmer Inc., y Chou realizaron las investigaciones resumidas aquí.

más de la resistencia a la temperatura, la matriz metálica ofrece nuevas ventajas. Su mayor resistencia mecánica complementa la propia de las fibras que la refuerzan; su ductilidad proporciona tenacidad al material híbrido. Mas ese tipo de matriz conlleva dos problemas: una densidad superior en comparación con los polímeros, aun cuando los metales ligeros como aluminio, magnesio y titanio constituyan las matrices habituales, y una mayor complejidad de procesado. Mientras que la fabricación de muchos híbridos avanzados de matriz polimérica se ha convertido en rutina, el desarrollo de materiales híbridos de matriz metálica ha progresado más lentamente, en parte debido a las condiciones extremas bajo las que hay que llevar a cabo el proceso de incluir fibras de alta resistencia en una matriz de metal.

La estrategia obvia de infiltrar un haz de fibras en metal fundido reclama temperaturas elevadísimas. Esto conlleva el grave riesgo de inducir reacciones en las intercaras: reacciones químicas entre fibras y matriz. Si las reacciones tienen lugar en una capa delgada pueden servir para unir fibras y matriz, pero si los productos de reacción forman una capa más gruesa podrían debilitar el enlace y degradar fibras y matriz.

Para salir al paso de tales reacciones se han ingeniado procesos de fabricación que admiten temperaturas más bajas. En una de las técnicas, la unión por difusión, se une la matriz metálica en forma de láminas o polvo con las fibras bajo altas presiones, a temperaturas por debajo del punto de fusión del metal. La difusión del metal en estado sólido da coherencia al material híbrido. A temperaturas más bajas todavía que las necesarias para la unión por difusión pueden tener lugar importantes reacciones interfaciales entre una matriz de aluminio o magnesio y fibras de grafito o boro. Tales fibras se recubren previamente con un agente químico, una barrera, que impide en buena medida las reacciones con la matriz.

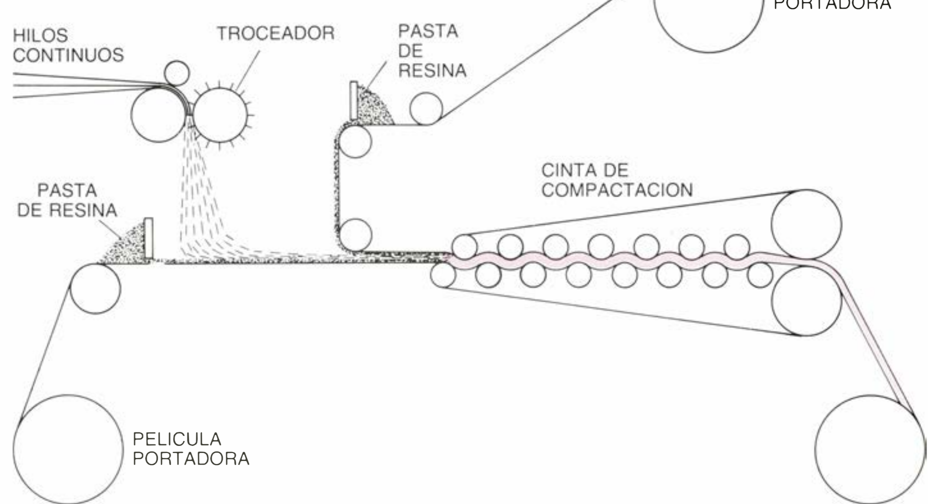
Los materiales híbridos de matriz metálica pueden emplearse en las zonas más frías de la superficie de un avión hipersónico. Ahora bien, en la proa, en los bordes de ataque de las alas o en los motores, la temperatura podría sobrepasar el punto de fusión de la matriz metálica. Para estas zonas los diseñadores estudian la posibilidad de usar un material híbrido con matrices tan resistentes al calor como las propias fibras, sin menoscabo de su ligereza y potencial resistencia y rigidez: las matrices cerámicas. En razón de su fragilidad, las cerámicas se comportan de forma distinta que otras matrices. En los materiales híbridos de matriz metálica o polimérica, las fibras suministran la mayor parte de la resistencia; propio de la matriz dúctil es conferir tenacidad al sistema. Y aunque una matriz cerámica ya es suficientemente rígida y resistente, para sacarle todo el partido tenemos que aumentar su tenacidad.

Las fibras de un material híbrido de matriz cerámica solucionan este problema bloqueando el crecimiento de las grietas. Si una grieta en crecimiento se encuentra con una fibra puede tomar un camino desviado o separar la fibra de la matriz. Ambos procesos absorben energía, retrasando el avance de la grieta. Aun cuando la matriz esté plagada de grietas tardará más en rom-

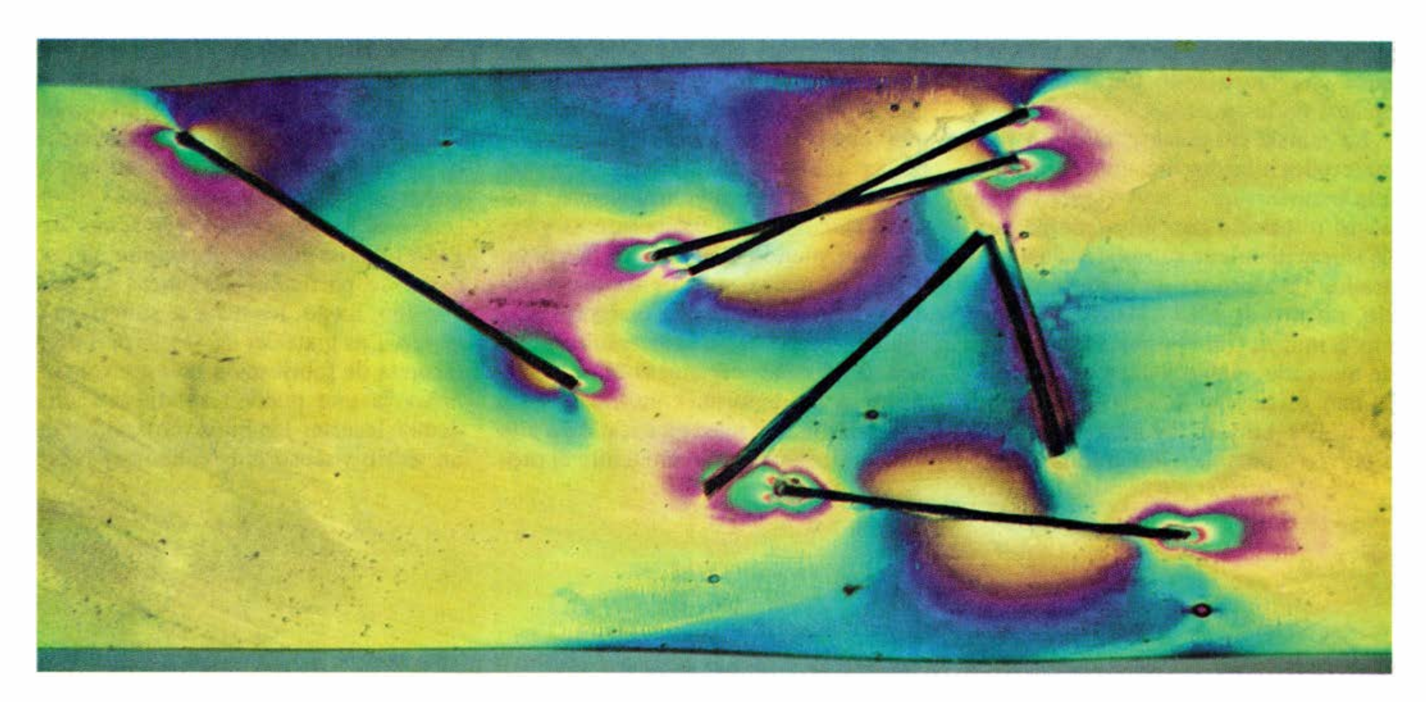
perse que una cerámica sin reforzar, pues una madeja de fibras anula los efectos de las grietas.

La matriz cerámica confiere a tales materiales híbridos una gran resistencia a la temperatura. Un vidrio de borosilicato reforzado con fibras de carburo de silicio mantiene su resistencia a 1000 grados C. Matrices de carburo de silicio, nitruro de silicio, óxido de aluminio o mulita (un compuesto complejo de aluminio, silicio y oxígeno) proporcionan materiales híbridos que continúan sirviendo, en algunos casos, hasta a temperaturas de 1700 grados C. Muchos materiales híbridos de matriz cerámica adquieren mayor tenacidad (y por tanto mayor resistencia) a medida que sube la temperatura. Entre los granos cristalinos que forman muchas cerámicas aparecen regiones vítreas, que se ablandan a altas temperaturas y actúan deteniendo el avance de la grieta.

La resistencia al calor de los materiales híbridos de matriz cerámica dificulta su elaboración. No resulta práctico fundir las cerámicas y generalmente se les da forma consolidando los polvos de la cerámica en cuestión a alta temperatura y presión mediante el proceso de sinterización. Una simple ampliación de dicho método puede ser un sistema de producción de materiales híbridos de matriz cerámica: fibras cortas o "pelos de bigote" se mezclan con el polvo de cerámica antes de ser sinterizados. Si los reforzantes son fibras largas o hilos se pueden impregnar en una pasta de partículas cerámicas en suspensión; luego, los hilos se sinterizan a la vez. Las matrices de vidrio permiten técnicas de fabricación más convencionales ya que pueden ablandarse. Podemos insertar los hilos reforzantes en un vidrio viscoso muy caliente y luego



4 FABRICACION de un material híbrido de matriz polimérica. La elaboración empieza en los hilos continuos de material reforzante. En la producción de un material híbrido avanzado (*arriba*), las fibras se desenrollan de unas bobinas, se alinean tras un tratamiento superficial pensado para facilitar la adherencia a la matriz y se recubren con la resina polimérica. Se consolidan en forma de cintas o láminas que luego pueden ensamblarse en una estructura laminada (*arriba, a la derecha*). En otro proceso optativo se arrollan las fibras impregnadas en una forma complicada a través de un trenzado de filamentos (*centro, derecha*). Generalmente, la estructura del material híbrido acabado debe curarse para endurecer la matriz. Los plásticos comerciales reforzados y endurecidos con fibras cortas se fabrican en compuestos de láminas moldeadas (*abajo, derecha*). Las fibras reforzantes se trocean, se depositan sobre una pasta y se recubren con otra capa de pasta. Seguidamente, la lámina se consolida. El conjunto, de textura viscosa, puede ser moldeado y curado.



5. INTERACCION ENTRE FIBRA Y MATRIZ, ilustrada en una imagen de una muestra de material híbrido sometida a tensión y fotografiada bajo prismas cruzados polarizantes. La matriz de epoxy se refuerza con haces cortos y rígidos de fibra de grafito. Las tensiones de la matriz deformada se ponen de manifiesto por los distintos colores. Las fibras amortiguan la deformación del material de la matriz adyacente, provocando que la tensión se concentre en los extremos de las fibras; en los materiales híbridos de fibra corta, las grietas de la matriz suelen a comenzar en dichos puntos. Los colores sugieren la compleja relación entre las tensiones que rodean a las fibras próximas, un fenómeno que complica la predicción matemática de las propiedades de los híbridos de fibra corta.

prensar ambos para formar la estructura acabada del material híbrido.

De características afines a los materiales híbridos de matriz cerámica, aunque originado en distinta fabricación, hay un híbrido en el que matriz y fibras reforzantes son de carbono elemental. El reforzante de un material híbrido carbono–carbono es el elemento en su forma semicristalina, grafito; en la matriz, el carbono se encuentra generalmente en su presentación amorfa. Los materiales híbridos carbono–carbono mantienen gran parte de su resistencia a 2500 grados C y se utilizan en los conos de proa de los vehículos de reentrada de los misiles. A diferencia de muchos materiales híbridos de matriz cerámica, éstos son vulnerables a la oxidación a altas temperaturas. Para proteger los híbridos de carbono–carbono se les aplica una delgada capa cerámica sobre su superficie.

Las primeras etapas de la fabricación de un material híbrido de carbono–carbono son similares a los de un



6. ESTRUCTURAS ANOMALAS generadas alrededor de una fibra inserta en una matriz polimérica. En muchos materiales híbridos, ciertos procesos físicos y químicos no usuales se desarrollan sobre la superficie de una fibra y afectan a las propiedades locales de la matriz; esta fotografía ilustra un caso de esos. A medida que este polímero termoplástico se enfría desde su estado de fusión, el crecimiento de cristales a distancia de la fibra se produce en torno a puntos de nucleación, dando lugar a ''esferulitas'', con el aspecto de manchas solares, morfología típica de muchos polímeros. La nucleación alrededor de la fibra, por el contrario, crea un escudo de cristalitos aciculares. Estos polímeros semicristalinos se pueden considerar materiales híbridos, formados por una amplia gama de estructuras cristalinas reforzantes dentro de una matriz de regiones menos ordenadas. La micrografía fue suministrada por Imperial Chemical.

material de matriz polimérica. Las fibras de grafito se impregnan en una resina fenólica, un tipo de polímero. El conjunto empapado en resina se calienta en una atmósfera inerte, pirrolizando la resina –quemándola parcialmente, como al obtener de la madera carbón vegetal–, tras lo cual queda un residuo final de carbono. El material híbrido se vuelve a impregnar en resina bajo alta presión y se pirroliza de nuevo. Repitiendo muchas veces el proceso, se consigue una estructura sólida con un mínimo de poros. Otro sistema de fabricar la matriz acude a la deposición de un vapor de un compuesto químico, de modo que la descomposición de un gas orgánico introduzca carbono entre las fibras.

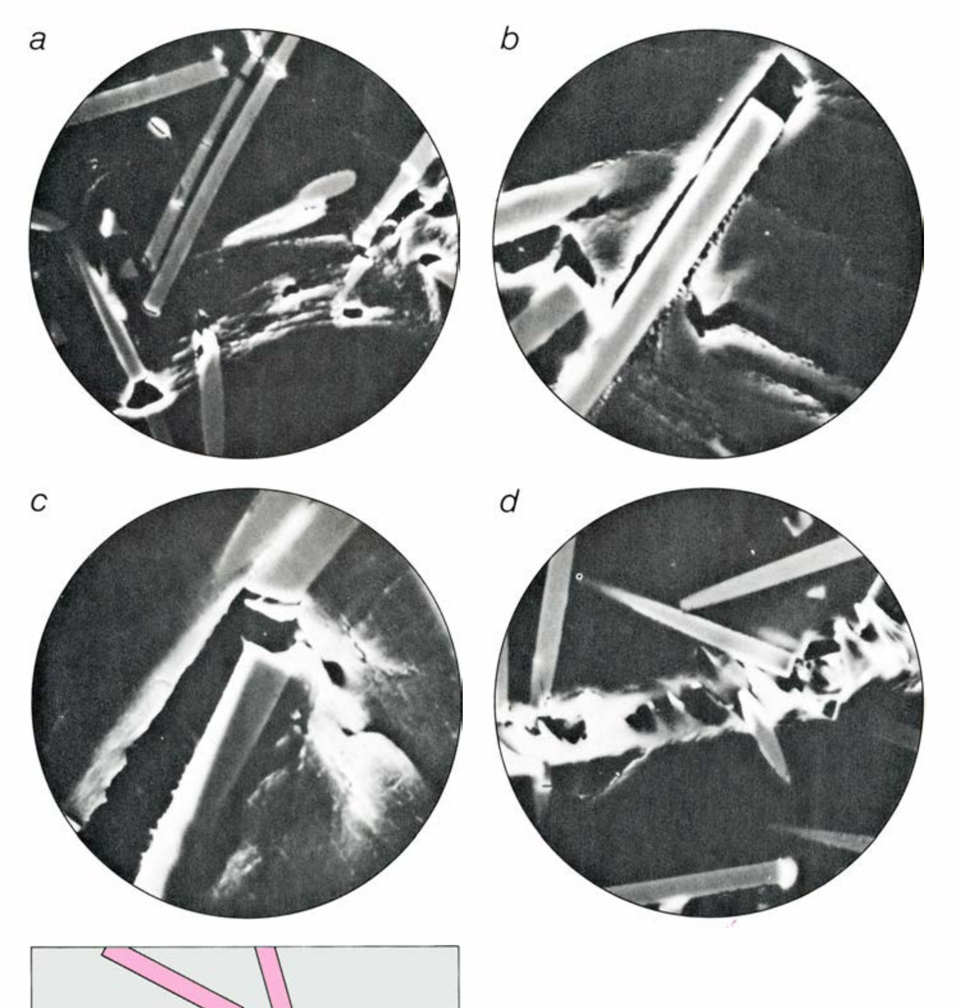
Las temperaturas que habrá de soportar un material híbrido condicionan, en gran parte, la elección de la matriz. ¿Cómo se seleccionan las fibras reforzantes? Todos los reforzantes cerámicos, poliméricos o de elementos son resistentes, pero difieren en diversos aspectos. La resistencia a la tracción de las fibras de vidrio, por ejemplo, iguala o supera la de las fibras de grafito, uno de los más interesantes materiales híbridos de buen comportamiento. Sin embargo, las fibras de vidrio sufren cierto aumento de longitud cuando están sometidas a grandes tensiones. Por tanto, los híbridos reforzados con vidrio no resultan adecuados para aquellas aplicaciones en las que la rigidez constituye una propiedad decisiva. No obstante, su bajo costo ha propiciado su generalización en usos menos exigentes.

Algunos reforzantes pueden ser más indicados que el grafito para los casos en que se busque un material híbrido de resistencia al choque. La estructura de un helicóptero de combate debe mantenerse intacta cuando es alcanzada por disparos de bala; por tanto, el reforzante del híbrido superficial tendría que ser de fibras poliméricas o aramidas, aunque tenaces, menos rígidas. Las fibras de boro elemental son, por contra, más rígidas que las de grafito. A ellas se recurría como reforzante de altas prestaciones, pero han perdido su puesto privilegiado porque resultan caras y, comparadas con el grafito, más densas.

Las fibras reforzantes han de adecuar su naturaleza a sus funciones mecánicas y químicas. Un primer requisito es soportar las condiciones de proceso exigidas por la matriz. Las fibras de aramidas se chamuscarían si se expusieran a las temperaturas necesarias para consolidar un material híbrido de matriz metálica; y las fibras de grafito incorporadas en una matriz metálica o cerámica se oxidarían y se debilitarían, a menos que el proceso se realizara en una atmósfera inerte.

La compatibilidad química entre fibras y matriz es esencial en sus zonas de contacto: la superficie de las fibras. En los materiales híbridos de matriz metálica o polimérica debe producirse un enlace entre el reforzante y la matriz para que actúen conjuntamente. Lo primero que la adherencia necesita es que la matriz, en su forma fluida, sea capaz de humedecer las fibras. El óxido de aluminio y el carburo de silicio se empapan fácilmente con los metales fundidos y por eso se usan como fibras reforzantes en los materiales híbridos de matriz metálica. Si la matriz fuera incapaz de mojar las fibras, éstas podrían recibir un recubrimiento que, al interaccionar a la vez con la fibra y la matriz, fomentara el contacto. En algunos casos, variando la composición de la matriz se puede favorecer este proceso. Una vez la matriz empapa las fibras pueden establecer un enlace las fuerzas intermoleculares o alguna reacción química.

Las propiedades de un material híbrido avanzado dependen del tipo de matriz, el material reforzante que contenga y un tercer factor: la geometría del refuerzo. En algunos híbridos, la geometría no sigue ningún patrón. Los metales reforzados por dispersión (endurecidos por minúsculas partículas de impurezas, siendo éstas un precipitado formado al enfriar el metal fundido o partículas cerámicas dispersadas activamente en el metal) constituyen



7. MODOS DE FRACTURA que acompañan a la propagación de una grieta en un material híbrido, fotografiados por medio de un microscopio electrónico de barrido en muestras de un híbrido de fibras cortas. Las micrografías se explican en el diagrama de la izquierda, que proporciona una visión general del proceso. El aumento de tensión en el frente de una grieta puede sobrecargar y romper las fibras reforzantes (*a*), empujar las fibras fuera de la matriz (*b*) o separar la matriz de la fibra (*c*). Al propagarse entre las fibras, la grieta provoca la deformación y fractura de la matriz (*d*). Klaus Friedrich, de la Universidad de Hamburgo, es el autor de la fotografía.

un tipo de material híbrido en el que sólo se controla la concentración de las partículas endurecedoras, no sus dimensiones exactas ni su orientación. Lo mismo sucede con muchos híbridos que contienen fibras cortas, una categoría que incluye muchos plásticos comerciales reforzados con vidrio y algunos materiales híbridos de matriz metálica o cerámica reforzados con "pelos de bigote".

Dos razones explican por qué que los materiales híbridos de altas prestaciones se endurecen con fibras mucho más largas, generalmente agrupadas formando un hilo continuo. Si en el material híbrido se quiere aprovechar la alta resistencia del reforzante, éste debe ser capaz de soportar tensiones hasta el límite de rotura. De lo contrario, el híbrido fallará ante una carga inferior a la tensión que las fibras pueden soportar teóricamente y se separarán de la matriz sin romperse a medida que el híbrido vaya desintegrándose.

Puesto que la carga se transmite de la matriz a las fibras reforzantes a través de fuerzas de cizalladura que actúan sobre su superficie, el área superficial deberá ser grande en relación con el área transversal. En otras palabras, un elemento reforzante eficiente será mucho más largo en una de sus dimensiones que en las otras dos. Para muchos agentes reforzantes, la relación de forma crítica, o relación entre longitud y diámetro para que la fibra logre aguantar íntegra hasta la tensión de rotura, es de 100:1. La razón exacta depende de la resistencia de la fibra, del carácter de la matriz y del grado de enlace entre ambas.

Por eso, las fibras largas refuerzan el material híbrido con una eficacia mayor que lo hacen las fibras cortas o las partículas. Hay una segunda razón por la que las fibras continuas han alcanzado un lugar preeminente en el reforzamiento de los materiales híbridos avanzados: el control preciso de su orientación. Así, la estructura interna del material híbrido puede ser diseñada con vistas a las tensiones que deberá soportar en su uso real.

La geometría interna de los materiales híbridos convencionales de altas prestaciones se parece a la de la madera contrachapada: constan de varias capas delgadas, reforzada cada una por fibras continuas alineadas en una sola dirección. El método corriente de fabricación de materiales híbridos avanzados de matriz polimérica, la impregnación previa de cintas o láminas y su acabado a mano conducen a la producción de tales estructuras laminares. Las capas sucesivas pueden orientarse según diferentes direcciones para conferir al producto rigidez y resistencia según varios ejes, pero tales materiales híbridos adolecen de que ninguna fibra reforzante cruza de una capa a la otra o se dispone transversalmente dentro de una de ellas. Bajo tensiones extremas, el material híbrido puede exfoliarse, resbalando sus capas unas contra otras, y llegar a separarse las fibras paralelas en las distintas placas.

Tales laminados unidireccionales oponen además poca resistencia al impacto. En los materiales híbridos de matriz metálica, por ejemplo, esta última, por sí sola, puede ser suficientemente dúctil y por tanto tenaz. La introducción de un denso entramado de fibras a las que el metal se enlaza fuertemente puede restarle dureza, al limitar su capacidad de disipar la energía de un choque por medio de la deformación plástica. En vez de eso, se agrieta; y en un material híbrido laminado convencional la grieta puede encontrar un camino fácil entre las capas de fibras. Como resultado, un impacto que mellaría un metal sin reforzar podría destrozar el híbrido al que el metal sirve de matriz.

Para endurecer los materiales híbridos en muchas direcciones a la vez y aumentar su resistencia al choque, los ingenieros han comenzado a entretejer las fibras reforzantes de diversas maneras: trenzados, anudados (como una labor de punto) o entrelazados. La elección de una disposición determinada la imponen el coste, la resistencia direccional y la flexibilidad. Un trenzado sencillo endurecerá el material híbrido en las direcciones de la trama y la urdimbre del tejido. Los tejidos complejos, más caros, ofrecen, en contrapartida, resistencia a lo largo de cierto número de direcciones intermedias. Con algunos tipos de punto se consigue un tejido elástico que confiere mayor tenacidad al material híbrido, a costa de perder cierta rigidez.

Un tejido plano sigue siendo una estructura laminada con sus debilidades inherentes. Para eliminar las direcciones en que el material híbrido en conjunto es débil, se puede aportar al reforzamiento una estructura tridimensional. Las fibras de grafito en un híbrido de carbono–carbono, por ejemplo, se disponen con un trenzado tridimensional ortogonal, según un esquema donde los hilos quedan orientados en tres ejes perpendiculares entre sí. Un material híbrido reforzado con un trenzado tridimensional ortogonal se trabaja luego para darle su forma final, si bien una nueva técnica que permite entrecruzar fibras largas en disposiciones tridimensionales nos faculta para construir directamente piezas complejas. De esta manera, no sólo mejoran las características de los materiales híbridos, sino que también se eliminan los pasos finales de fabricación, compensando en parte los gastos y la complejidad de hacer el reforzamiento entrecruzado y de llenar el tejido denso con resina o metal fundido.

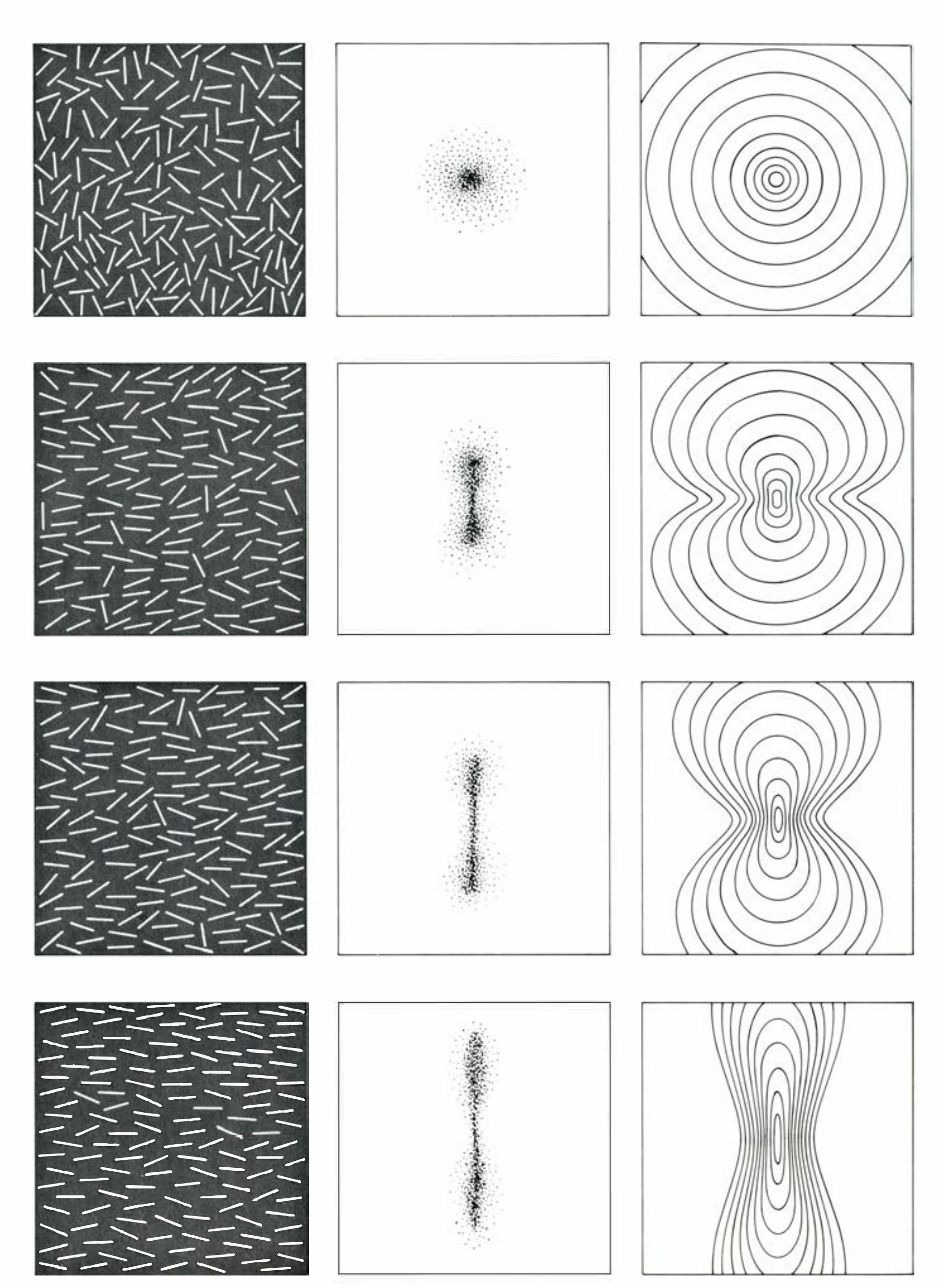
8. FALLO POR COMPRESION de un material híbrido hecho de fibras de óxido de aluminio en una matriz de aluminio; se produce al plegarse las fibras. Cuando esas configuraciones apretadas de fibras se retuercen, las fibras adyacentes tienden a fallar y doblarse en la misma dirección. Conforme van resbalando una sobre otra, la matriz que amasa las fibras está sometida a un esfuerzo de cizalladura. La resistencia de la matriz a la cizalladura determina en gran parte la resistencia a la compresión a lo largo del eje de fibra.

Recientes estudios ponen de manifiesto que el tejido tridimensional proporciona a los materiales híbridos de matriz metálica un considerable aumento de tenacidad. En el estudio se comparó la resistencia al choque de aluminio sin reforzar, aluminio reforzado con fibras unidireccionales de óxido de aluminio y aluminio reforzado con haces de fibras entrecruzadas en una disposición tridimensional. El aluminio sin reforzar, dúctil, absorbe una considerable energía del impacto sin romperse, mientras que el material híbrido laminado se fragmenta en mil pedazos ante un impacto más suave. El material híbrido con tejido, sin embargo, puede absorber un impacto de energía casi tan alta como el metal no reforzado. El refuerzo en todo su espesor proporcionado por una red de fibras tridimensional evita la exfoliación y obliga a las grietas a seguir un camino tortuoso, aumentando de esta manera la disipación de la energía del impacto.

La capacidad de especificar no sólo la composición, sino también la geometría interna, permite al diseñador de un material híbrido un control sin precedentes sobre el mismo. Ahora bien, el ejercer este control de forma sagaz requiere unos conocimientos básicos: la capacidad de predecir el efecto de cada variable sobre las prestaciones del producto. Podemos predecir el comportamiento de un híbrido laminado dominando las propiedades de una sola capa. A medida que las combinaciones de fibra y matriz se han multiplicado y los laminados simples han comenzado a perder terreno frente a los tejidos complejos, los investigadores han ido poniendo en práctica nuevos métodos para superar el trabajo empírico. Se proponen predecir directamente el comportamiento a partir de las características de las fibras y la matriz y su configuración.

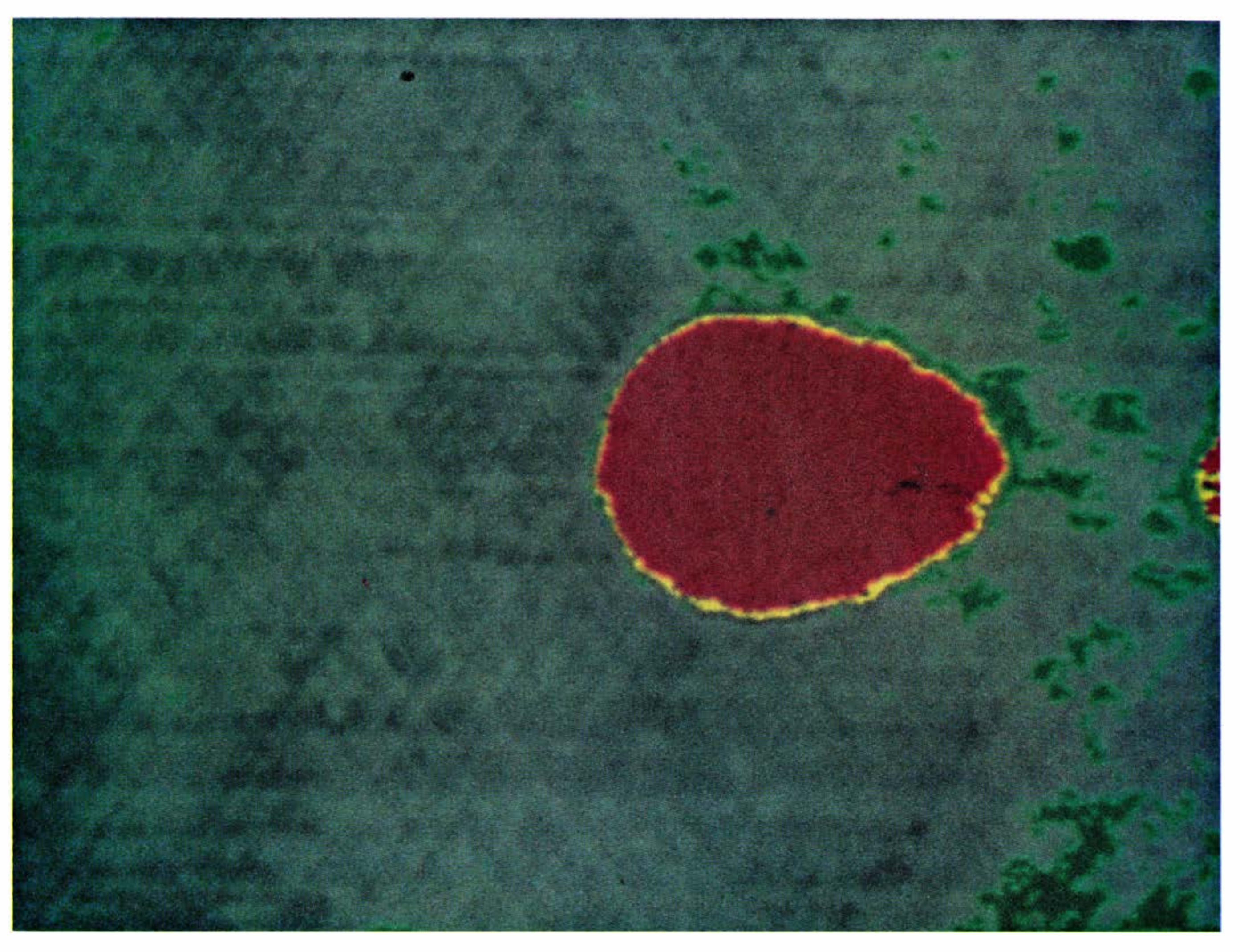
Muchas de las propiedades que influyen en las posibilidades de uso del material híbrido vienen determinadas por el comportamiento promediado de las fibras y la matriz. Entre tales propiedades se cuentan la rigidez, conductividad térmica, coeficiente térmico de expansión, módulo de Poisson (el grado en que un material se contrae lateralmente al ser estirado). Estas propiedades, llamadas termoelásticas, gobiernan la deformación del material. Determinan, por ejemplo, la flexión de un vástago de material híbrido del ala de un avión bajo cargas normales y cuánto cambiará su forma al ser calentado y enfriado.

¿Cómo afecta la geometría interna del material híbrido a estas propiedades "promediadas"? La influencia de la orientación de las fibras sobre la rigidez total de un material híbrido unidireccional nos suministra un ejemplo. Puede considerarse que la rigidez media de las fibras a lo largo de su eje y la rigidez media de la matriz actúan en paralelo. Igual que en un conjunto de muelles duros y blandos actuando solidariamente, los elementos duros dominan la respuesta del sistema. Si las fibras son el componente rígido, caso más general, la rigidez longitudinal del híbrido será, por lo menos, del tenor de la rigidez de las fibras, multiplicada por la proporción en que se halla en el material híbrido.



9. ORIENTACION DE LA FIBRA en un material híbrido de fibra corta. Se determina cuantitativamente mediante una técnica ideada en la Universidad de Delaware, en la que una micrografía del conjunto se utiliza como red de difracción. Cuando la luz atraviesa un negativo fotográfico de la imagen, las fibras reforzantes cortas, que aparecen blancas sobre el fondo oscuro (*izquierda*) actúan como rendijas de la red. La luz que atraviesa cada rendija se dispersa según un ángulo recto con respecto al eje de la rendija; en consecuencia, la figura de difracción se alarga más en la dirección perpendicular a la orientación de la fibra. Comparando la figura de difracción registrada (*en el centro*) con una figura teórica calculada a partir de un grado específico de orientación de fibra (*a la derecha*) se obtiene una medida de la orientación de la fibra. A medida que la orientación aumenta (*de arriba abajo*) las propiedades del conjunto ganan en direccionalidad. La resistencia a la tracción y la rigidez de un conjunto de fibra corta son máximas a lo largo de la orientación de su eje.

La rigidez del híbrido en la dirección transversal a las fibras se representa por cierto número de muelles duros y blandos conectados en serie, uno detrás de otro. Esta disposición hace que los muelles menos duros regulen el sistema. Aunque los muelles duros (fi-



10. BARRIDO CON ULTRASONIDOS de un material híbrido de matriz polimérica. Pone de manifiesto defectos que pueden menguar la resistencia del material. Las ondas de ultrasonidos se reflejan en la estructura interna del material híbrido. Un análisis por ordenador de la energía reflejada recoge aspectos tales como la refracción (*curvado*), el tiempo que tarda en llegar la señal y la atenuación para localizar los defectos y clasificarlos en sus diversos tipos. Con técnicas de procesado de imagen se obtiene un mapa cuyos colores indican diversos defectos: el rojo corresponde a una exfoliación, el verde a regiones porosas o excesivamente ricas en resinas de la matriz y las marcas amarillas señalan los límites del defecto. Las fibras que refuerzan al material híbrido aparecen en color gris. La imagen se reproduce aquí por cortesía de Robert A. Blake, Jr., del Center for Composite Materials, adscrito a la Universidad de Delaware.

bras) sean virtualmente rígidos, la contribución de los muelles blandos (matriz) dominará la rigidez total del sistema.

Un análisis matemático que tenga en cuenta tales consideraciones avanzará las propiedades promedio que no estén muy lejos del comportamiento longitudinal observado en capas de material híbrido unidireccionales. En cuanto a la predicción de propiedades en otras direcciones, surgen grandes discrepancias; este modelo simple tiende, por ejemplo, a infravalorar la rigidez transversal del híbrido. Otros factores, así la forma de la sección transversal de las fibras y la manera en que están dispuestas, influyen sobre las propiedades en las direcciones transversales a las fibras.

A lo largo de los últimos 20 años se han venido refinando las técnicas para predecir qué propiedades termoelásticas caracterizarán a los híbridos avanzados. Los modelos de predicción para capas unidireccionales se han desarrollado en todas sus posibilidades y describen las propiedades termoelásticas según cualquier dirección de un material híbrido elaborado con tales capas. Se están desarrollando modelos rigurosos que puedan adelantar el comportamiento de materiales híbridos reforzados con tejidos planos y con entramados tridimensionales.

Los investigadores han tenido que acudir a tratamientos aproximativos para predecir las propiedades de materiales híbridos de fibra corta, como el poliéster reforzado con fibra de vidrio. Su geometría interna está bastante menos definida que la de los híbridos de fibra continua: la orientación de sus fibras reforzantes es imperfecta, si no totalmente desordenada, y en las diferentes porciones de material cambia la longitud de la fibra. Una predicción acertada de las propiedades termoelásticas de los materiales híbridos de fibra corta exige información sobre la orientación y longitud de las fibras. Pequeñas variaciones del proceso influyen poderosamente sobre estas distribuciones; pueden dar lugar, por ejemplo, a la rotura de un gran número de filamentos o a la aparición de diagramas de flujo en la resina que alineen las fibras en una o varias direcciones. De aquí que las descripciones teóricas complejas de las prestaciones de materiales híbridos de fibra corta pasen primero por la predicción de los efectos del proceso sobre la estructura interna para poder vislumbrar los efectos que la estructura interna ejercerá sobre las propiedades.

Muchísimo menos directo resulta predecir el comportamiento del material híbrido bajo tensión, compresión o cizalladura que adelantar propiedades termoelásticas, la rigidez por ejemplo.

La resistencia no la determina el rendimiento medio de cada componente en un material híbrido, sino los defectos locales. Estos actúan como eslabones débiles, acotando el límite de rotura del material híbrido sin que importe cuán resistente sea el resto del material. Los defectos habituales (pensemos en la exfoliación local) condicionan las prestaciones del material híbrido menos que antaño, debido a la mejora de los métodos de fabricación y a las técnicas de detección de defectos, tales como el rastreo por ultrasonidos del híbrido acabado. Pero las fibras reforzantes varían de resistencia, y por ahora no hay manera de conocer ni la localización precisa ni la resistencia del elemento de fibra más débil.

La resistencia de un híbrido debe definirse, pues, en función de la variación estadística de las resistencias de las fibras. Al hacer tal predicción, conviene tener en cuenta los factores que influyan en la probabilidad de que la fractura de una fibra débil se extienda a otra y conduzca a la rotura total del material híbrido. Entre esos factores, recordemos la eficiencia con que la carga se transmite entre la matriz y las fibras. Si las piezas de la fibra rota siguen sometidas a tensión por efecto de la matriz, se transmitirá menos carga a las fibras adyacentes enteras y, por tanto, se reducirá su probabilidad de rotura.

Otro factor: la fragilidad de la matriz; actúa sobre el crecimiento de grietas y, en consecuencia, sobre el límite de rotura. Al romperse, la fibra emite un pulso de energía; en una matriz frágil, este pulso energético puede iniciar una grieta que se propague, a través de la matriz, hasta una fibra adyacente. A menos que el enlace entre la matriz y la segunda fibra sea suficientemente débil, la grieta puede hacer que ésta falle también. Así pues, la adherencia entre la matriz y las fibras incide también en la resistencia a la rotura de un material híbrido. En una matriz frágil, una cerámica por ejemplo, los enlaces débiles confieren tenacidad al híbrido y aumentan con ello su resistencia práctica, aunque generalmente un enlace fuerte facilita que las fibras refuercen al material híbrido de un modo más eficaz.

El progreso hacia un tratamiento científico de las innumerables variables relacionadas con el diseño de materiales híbridos ha alentado a los investigadores a contemplar nuevas complejidades. Un material híbrido corriente, reforzado con fibras rígidas y rectas, muestra un valor casi constante de rigidez: la deformación ante la tracción, o el grado de elongación, aumenta linealmente con la tensión de tracción aplicada al híbrido. Asistimos a un interés por el diseño de nuevos híbridos que gocen de unas relaciones específicas no lineales entre deformación y tensión.

Pertenece a éstos un híbrido elaborado con fibras onduladas en una matriz elastomérica (al estilo de las gomas) que puede alargarse fácilmente a tensiones bajas y tornarse rígido cuando las fibras se extienden del todo. Un híbrido mixto y endurecido con dos clases de fibras, unas frágiles e inextensibles y las otras dúctiles y tenaces, desplegará el comportamiento opuesto. Las fibras rígidas provocan que la tensión aumente drásticamente incluso ante bajas deformaciones; ahora bien, si la deformación es suficiente para fracturar las fibras rígidas y frágiles, la curva tensión–deformación se aplana. Las fibras dúctiles empiezan a intervenir, lo que provocará que el híbrido se torne extensible. Este diseño mixto puede proporcionar un material que combine la rigidez de un material híbrido ordinario que contenga sólo fibras rígidas con otro dotado de una mayor tenacidad.

El grado de control sobre las propiedades de los materiales tipificados como mixtos está transformando la ingeniería. Debido en parte a que los materiales homogéneos –metales y aleaciones– no ofrecen un control similar, la especificación del material y el diseño de un híbrido se venían considerando tradicionalmente por separado. A medida que los híbridos comienzan a sustituir a los materiales tradicionales en el campo aeroespacial y otros, el diseño de un componente y la selección del material se solapan y se convierten en aspectos de un mismo proceso.

La microestructura controlable de un material híbrido permite adecuarla a la distribución de tensiones que sufriría en la realidad. Al mismo tiempo, los componentes reflejarán la distinta naturaleza de los materiales híbridos: sus propiedades direccionales y las formas enrevesadas que pueden presentar gracias al moldeado por inyección, arrollamiento de filamentos y entrecruzamiento tridimensional, entre otros procesos. La inherente complejidad que implica aunar componentes y materiales sugiere que el diseño industrial ha de crecer con la ayuda, cada vez mayor, de los ordenadores y los equipos multidisciplinares. Tal manera de trabajar hará que se aprovechen las posibilidades de los materiales híbridos en las tecnologías del futuro.

Juegos de ordenador

Compendio de caricatura informatizada: insólito paseo por el espacio fisonómico

A. K. Dewdney

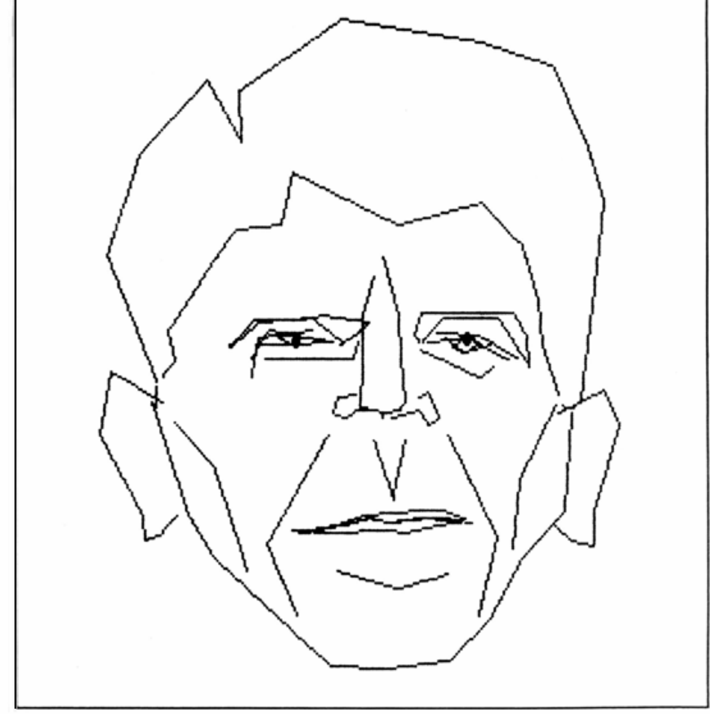
El rostro es inconfundible. Orejas bajas y colgantes, pómulos prominentes, alto copete. La cara de Ronald Reagan se conoce en todo el mundo; pero, por algún motivo, resulta todavía más fácil advertir el parecido en una caricatura que en una fotografía. El arte de la caricatura exige, sin duda, una profunda penetración y comprensión de la naturaleza humana. Y si ha de ser materia de computación, sin duda el ordenador no pasará de ser un adjunto banal –apenas más que un cuaderno de apuntes– que se limite a almacenar de forma gráfica las sutiles percepciones que el caricaturista nos traslada.

¿De veras? Las caricaturas de estas páginas las ha generado un programa concebido y puesto a punto por Susan E. Brennan, investigadora de plantilla de los Laboratorios Hewlett–Packard de Palo Alto, California. Para ejecutar el programa resulta útil disponer de ratón, lápiz óptico o algún otro equivalente de un lápiz; pero desde luego no son imprescindibles. Los resultados no dependen del pulso de nuestra mano ni de lo experimentada o perspicaz que sea nuestra mirada. Por el contrario, en cuanto se le proporciona al ordenador una imagen de parecido fotográfico al rostro que deseamos caricaturizar, el programa se encarga, por sí solo, de dibujar la caricatura. ¿Cómo lo logra? La respuesta es breve, y engañosamente simple: el programa compara la fotografía del rostro dado con un rostro promedio almacenado en la memoria del ordenador; los rasgos que más difieran del rostro patrón se exageran y se dibujan a mayor escala.

El programa de Brennan es fruto natural de su propio y muy considerable talento de caricaturista, y de su interés por los procesos cognitivos implícitos en el reconocimiento de los rostros humanos. Tales procesos han desconcertado, desde hace mucho, a psicólogos y estudiosos de la cognición; las caricaturas parecen desempeñar un papel especialmente relevante en el proceso, porque cuando se reconocen, lo son casi instantáneamente. ¿Acaso en lugar de recordar los rostros de nuestros amigos lo que memorizamos es su caricatura? Brennan inventó su sencilla técnica de generación de caricaturas para abordar tales cuestiones, y la describió en su tesis de licenciatura por el Instituto de Tecnología de Massachusetts. En su tiempo libre, Brennan sigue cultivando este campo; actualmente, en sus horas de trabajo se dedica a realizar experimentos relativos a nuevas formas de comunicación entre humanos y ordenadores, fundadas, en parte, en la comprensión del lenguaje natural.

Conceptualmente, la técnica de Brennan está íntimamente emparentada con el truco que los creadores de dibujos animados por ordenador denominan "intercalación". Imaginemos dos dibujos de objetos familiares, como una manzana y un plátano, construidos ambos conectado mediante líneas rectas cierto número de puntos. [*véase la figura 2*]. Seguidamente, cada punto de la manzana se empareja con un punto homólogo del plátano. Uniendo dichos pares de puntos mediante trazos rectilíneos, y tomando después los puntos medios de estos seg-





1. TUERCECARAS, *un programa basado en el trabajo de Susan E. Brennan, lleva del*

mentos, obtenemos una fruta híbrida, totalmente nueva, a medio camino entre banana y manzana: la banzana, evidentemente.

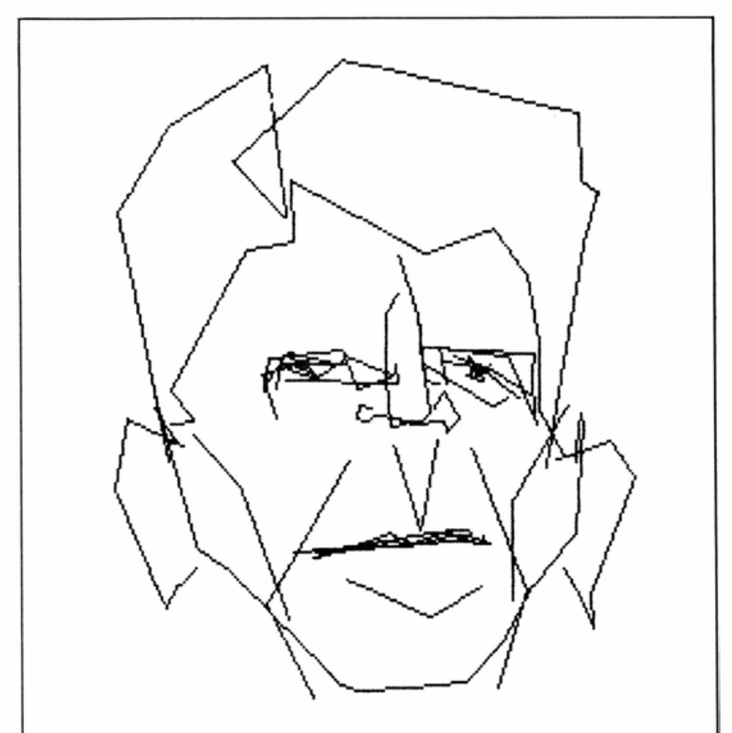
Las mismas rectas que conectan la manzana con el plátano pueden engendrar también una forma extrema de banana, desde el punto de vista de la manzana, por así decirlo. Prolonguemos cada uno de los trazos hasta que sobresalgan del plátano la mitad de su propia longitud, y marquemos sendos puntos en sus extremos. Al conectar los puntos surge una caricatura del plátano. Análogamente, haciendo sobresalir las líneas de conexión por el lado de la manzana se puede lograr una caricatura de la manzana –vista por el plátano. Pueden someterse los rostros a un tratamiento muy similar. Cada pareja de rostros define dos caricaturas mutuas. No obstante, las mejores caricaturas surgen de la comparación con una norma, con un rostro tipo.

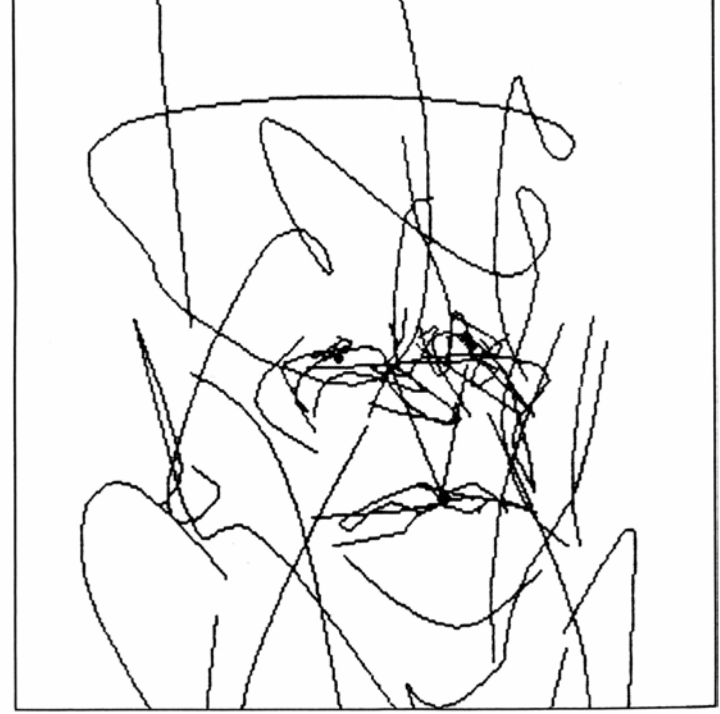
Las "normas", o caras patrón, del programa de Brennan se han confeccionado a partir de series de varias docenas de rostros reales, registrados en una base de datos, que contiene cientos de ellos. Se seleccionan los puntos que mejor sirvan para esquematizar las facciones de cada rostro y se les asignan coordenadas referidas a unos ejes cartesianos. El origen de los ejes se encuentra en el vértice superior izquierdo del plano de la figura, las coordenadas aumentan de izquierda a derecha y de arriba abajo. La escala está ajustada de modo que la pupila del ojo izquierdo se encuentre en el punto (135,145) y, la del derecho, en (190,145). Seguidamente, se promedian las coordenadas de los puntos correspondientes a cada rostro, al objeto de calcular el valor normal correspondiente a ese punto. Por ejemplo, combinando las coordenadas del vértice externo de la ceja izquierda se obtienen los valores medios de las coordenadas del vértice externo de la ceja izquierda del rostro promedio. Se construyen por este procedimiento tres rostros patrones, a saber: un rostro masculino promedio; un rostro femenino promedio y un rostro promedio de ambos. No sorprende que el promedio total ofrezca un aspecto un tanto andrógino; este rostro establece la norma para la mayoría de las caricaturas.

Para que el programa dibuje una caricatura basada en la norma, debe dársele una versión digitalizada de un rostro real. En la práctica, la cara comienza siendo fotográficamente idéntica; el programa va solicitando del operador que introduzca, por turno, los datos de cada uno de los 186 puntos claves de la fotografía. Por ejemplo, cuando el programa solicita los seis que delimitan la ceja izquierda, el usuario puede responder llevando el cursor de un ratón a los seis puntos sucesivos que definen en la pantalla la imagen fotográfica de la ceja izquierda.

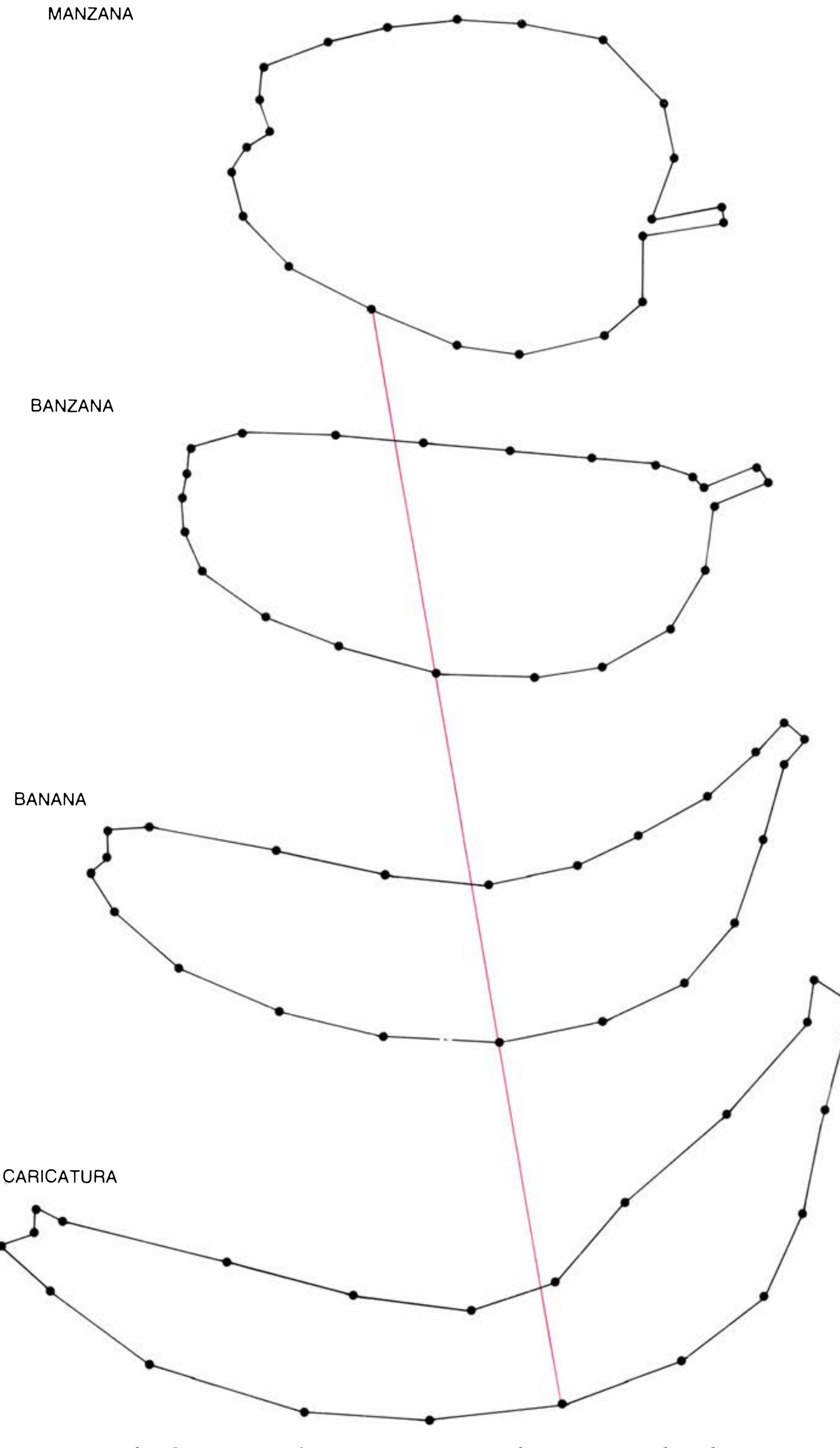
Resulta conveniente imaginar el programa de Brennan como una rápida lanzadera espacial concebida para explorar lo que ella llama espacio fisonómico. Las coordenadas que hemos ido dando, correspondientes a los puntos conspicuos que definen la imagen fotográficamente similar, pueden hilvanarse según un orden predeterminado. El resultado es una larga relación de números, que pueden tratarse como coordenadas de un único punto de un hiperespacio, o sea, un espacio de dimensión mayor que 3. Por ejemplo, tanto la cara fotográfica como la cara promedio quedan definidas en el plano de la pantalla por 186 puntos conspicuos, cada uno de los cuales tiene dos coordenadas. La correspondiente lista de los 372 números asociados a cada rostro puede considerarse un único punto de un espacio de dimensión 372. En principio, a cada rostro puede asignársele un punto del espacio fisonómico; dos rostros cualesquiera pueden conectarse por un segmento rectilíneo.

No nos amedrentemos, ni nos desconcertemos ante la noción de hiperespacio. El espacio fisonómico no pasa de ser una abstracción cómoda para describir los parecidos y discrepancias de los rostros. Las nociones familiares de línea recta y de distancia entre dos puntos se generalizan sin dificultad a todos los espacios de dimensión superior. Todos los puntos situados a lo largo de una línea recta del espacio fi-





realismo a la "desfacialización", con caricaturas intermedias del rostro de Ronald Reagan



2. Conversión de una manzana en plátano, y en ultraplátano

sonómico representan cambios proporcionales de los valores de cada coordenada. La distancia entre dos puntos del espacio fisonómico da una medida del parecido: los rostros parecidos son vecinos próximos en el espacio fisonómico; mientras que dos caras muy dispares están, literalmente, mucho más alejadas.

En el espacio fisonómico podemos imaginar que la norma, o rostro patrón, se encuentra próxima al centro de una nube de puntos que representan imágenes realistas de rostros auténticos. Cada rostro se une a la norma mediante un segmento rectilíneo. Los puntos situados a lo largo de esa recta corresponden a una sucesión de rostros intermedios, cada vez más parecidos al rostro auténtico. Cuando se rebasa la cara auténtica comienzan las caricaturas; pero existe un límite natural para que la exageración de los rasgos dé una imagen reconocible. Al final, las caricaturas pierden sus cualidades humanas y degeneran en un estado caótico, que Brennan llama "desfacialización".

La idea de que cada rostro es un punto de un espacio fisonómico sugiere otra fascinante transformación. Dado que dos caras cualesquiera del espacio fisonómico pueden conectarse por una línea recta, se le puede pedir al programa que engendre una secuencia de etapas de transición, que vayan de una cara a la otra. Brennan ha descubierto que tales secuencias son particularmente desconcertantes cuando los dos puntos extremos son hombre y mujer; el programa transforma sin esfuerzo a Elizabeth Taylor en, por ejemplo, el fallecido presidente Kennedy.

El lector puede repetir algunas de las proezas de Brennan en el campo de la caricatura, preparando para ello una versión más reducida de su programa; aquí lo llamaremos TUERCECARAS. Para ejecutarlo, el programa requiere que el usuario le suministre al menos dos rostros: una "norma" y el rostro que ha de caricaturizarse. He mencionado ya la norma, cuyas coordenadas nos facilitó generosamente Brennan [*véase la figura 5*]. El usuario tiene entonces que dar los datos relativos al rostro problema en la misma forma. Si el lector carece de refinados equipos de digitalización, puede todavía, sin excesivo dolor, convertir la fotografía de una persona querida (posiblemente él mismo) en una lista de coordenadas. Brennan advierte, sin embargo, que el rostro de la fotografía debe tener una expresión neutra y un poco lela, pues la más ligera sonrisa crecerá hasta convertirse en una mueca monstruosa. La cara debe mirar totalmente de frente: si la cabeza está vuelta, TUERCECARAS la hará volverse todavía más.

Para determinar la escala de los ejes, supongamos que las coordenadas de las pupilas izquierda y derecha sean las mismas que en los rostros patrón: la izquierda deberá estar en (135,145) y, la derecha, en (190,145). (Recordemos que las coordenadas horizontales aumentan de izquierda a derecha y, las verticales, hacia abajo.) Una vez establecida la escala de distancias, el usuario ha de determinar las restantes coordenadas mediante una cuidadosa medición. En el esquema de digitalización de Brennan, los puntos del rostro se organizan en 39 rasgos fisonómicos; cada rasgo o facción es una sucesión de puntos interconectados. El orden de los puntos depende de la orientación del rasgo: los rasgos que

sean principalmente horizontales se enumeran de izquierda a derecha, y los rasgos esencialmente verticales, de arriba abajo.

Brennan admite que la identificación de los puntos clave del rostro es cuestión que se resuelve, fundamentalmente, por tanteo; de todos modos, la cara del presidente Reagan puede servir de orientación. Por esta razón, es importante que sea una misma persona la que se encargue de efectuar la conversión de las fotografías en listas de coordenadas cuando se vaya a cargar con rostros una base de datos.

TUERCECARAS almacena las dos caras así digitalizadas en sendas tablas, o matrices bidimensionales, llamadas *cara* y *norma*. Para la creación de la cara a presentar en la pantalla hace falta una tercera tabla, la de presentación, que llamaremos *pres*. Estas tres tablas constan, cada una, de 186 filas y 2 columnas; cada fila alberga un punto facial, a razón de una coordenada por columna. Los puntos están organizados en el orden sucesivo dado en la lista correspondiente a *norma*. La ventaja de tal ordenación es que todas las líneas de la figura final se dibujan entre puntos sucesivos de la tabla; como es obvio, cuando un rasgo está completo y se está a punto de empezar otro, no se dibujan rectas que conecten el último punto del uno con el primero del otro.

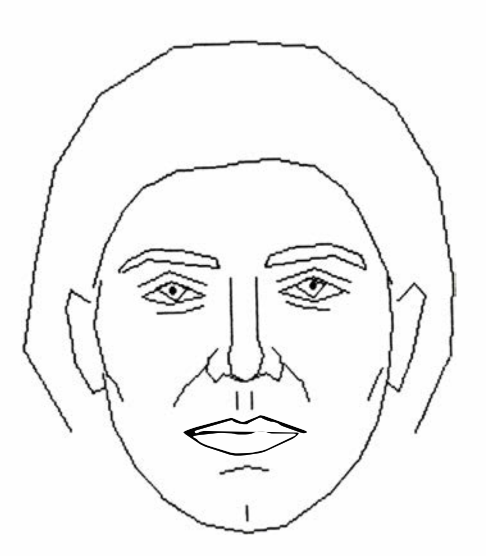
El primer rasgo que el programa dibuja es la pupila del ojo izquierdo; el segundo, la pupila derecha. Cada pupila puede representarse por un punto o bien por un circulito; por alguna razón, los circulitos dan semblantes más amistosos. Para las facciones restantes, sin embargo, se trazan rectas que conecten puntos consecutivos de la tabla. Para no dibujar el trazo que conectaría el último punto de un rasgo con el primero del siguiente se precisa una tabla especial llamadas *rasgos*. La tabla da el número de puntos que componen cada rasgo, y un bucle doble supervisa los saltos [*véase la figura 6*].

Dibujados ya los dos primeros rasgos, la rutina de presentación parte del tercer rasgo, a saber, el iris izquierdo. Su primer punto es el tercero de la tabla *pres*, que tiene por índice la variable *i*; por consiguiente, el valor de *i* se toma, de partida, igual a 3. La tabla *rasgos* lleva por índice otra variable, *j*, que va de 1 a 37, porque quedan 37 rasgos por dibujar. En el interior del bucle de índice *j* hay otra variable, llamada *recuento*, que lleva la cuenta del número de líneas dibujadas para cada rasgo; esta variable se incrementa en una unidad cada vez que se pasa por el bucle *j*. También el índice *i* aumenta con cada pasada por el bucle; identifica el punto de la tabla *pres* que en ese momento participa en el frenético ejercicio de conectar los puntos.

En el interior del bucle *j* hay una instrucción de control, del tipo "haz mientras"; su función es comparar el número de puntos del rasgo *j*–ésimo que hasta el momento se han enlazado con el número total de puntos de que consta esa facción. El programa abandona el bucle controlado por "mientras" cuando ambos números sean iguales; el rasgo se habrá terminado. Si en el rasgo quedan todavía puntos por conectar, el programa traza una línea desde el punto *i* de la tabla *pres* hasta el punto $i+1$. Mi notación no tiene más valor que el taquigráfico. Una orden de presentación verdadera exigiría trazar una línea desde el punto cuyas coordenadas son $pres(i,1)$ y $pres(i,2)$ hasta el punto de coordenadas $pres(i+1,1)$ y $pres(i+1,2)$.

El alma de TUERCECARAS es la rutina de exageración. Su estructura es aún más sencilla que la rutina de presentación que acabo de esbozar [*véase la figura 6*]. Para cada uno de los 186 puntos fisonómicos contenidos en las tablas *cara* y *norma*, el bucle de exageración calcula una nueva tabla, llamada *distorsión*. Se trata de la codificación de la caricatura en ciernes. Cada coordenada de la tabla *distorsión* se calcula sumando la correspondiente coordenada de la tabla *cara*, más una cantidad que exagera las diferencias entre *norma* y *cara*. El usuario ha de proporcionar el factor de exageración, *f*; este número actúa entonces como coeficiente de dilatación, multiplicándose por él las diferencias entre las abscisas de *cara* y *norma* y, también, las diferencias entre ordenadas.

Sólo queda ya pendiente la organización general del programa y, como opción, refinar el programa de dibujo. Una forma sencilla, no procedimental, de abordar la organización es situar tanto la rutina de presentación como la de exageración en el seno de un bucle interactivo que pregunte al usuario: "¿Quiere probar otra vez?" El programa también debe solicitar del usuario el factor de exageración. Conviene plantear esta petición de modo que sea posible ensayar diversos factores de exageración sin tener que introducir por segunda vez la tabla *cara*; de este modo resulta sencillo comparar los efectos producidos por diferentes factores.



3. La cara promedio, de aspecto andrógino

Los dibujos pueden mejorarse un poco conectando los puntos, no por trazos rectilíneos, sino con una "plantilla de curvas". Con su ayuda se pueden conectar los puntos mediante líneas suaves y evitar los zigzags. De ordinario, el programa de Brennan se vale de las curvas de una plantilla, y produce contornos faciales lisos, sin angulosidades. Me di cuenta, empero, de que podría resultar difícil explicar la construcción y uso de esas plantillas en una sección en gran medida dedicada a programas sencillos. Le pedí a Brennan un método alternativo. ¿No podrían usarse trazos rectos, en lugar de las curvas? Para gran sorpresa suya y mía, las caricaturas trazadas con líneas rectas resultaron casi tan buenas como las trazadas con plantilla. Más aún, todas las figuras suyas aquí presentadas se trazaron usando rectas. A cambio de sacrificar un poco el valor estético, el programador puede ahorrarse una técnica sumamente engorrosa. Dispongámonos inmediatamente a digitalizar nuestra fotografía favorita.

El generador de caricaturas de Brennan se ha utilizado en diversos estudios

4. Elizabeth Taylor (en Cleopatra) se reúne con el fallecido presidente Kennedy en el espacio fisonómico

PUPILA IZQUIERDA	1 PUNTO	(135,145)
PUPILA DERECHA	1 PUNTO	(190,145)
IRIS IZQUIERDO	5 PUNTOS	(134,141) (128,144) (133,149) (140,144) (135,141)
IRIS DERECHO	5 PUNTOS	(190,141) (184,144) (189,149) (196,144) (190,141)
BORDE INFERIOR DEL PARPADO IZQUIERDO	3 PUNTOS	(119,147) (133,140) (147,146)
BORDE INFERIOR DEL PARPADO DERECHO	3 PUNTOS	(177,147) (190,141) (203,147)
BORDE INFERIOR DEL OJO IZQUIERDO	3 PUNTOS	(121,147) (133,150) (147,146)
BORDE INFERIOR DEL OJO DERECHO	3 PUNTOS	(177,147) (191,150) (201,148)
BORDE SUPERIOR DEL OJO IZQUIERDO	3 PUNTOS	(118,143) (132,137) (148,142)
BORDE SUPERIOR DEL OJO DERECHO	3 PUNTOS	(176,143) (191,137) (204,143)
OJERA IZQUIERDA	3 PUNTOS	(127,154) (135,153) (144,150)
OJERA DERECHA	3 PUNTOS	(178,151) (187,154) (196,154)
LADO IZQUIERDO DE LA NARIZ	6 PUNTOS	(156,140) (156,153) (156,165) (154,172) (156,179) (161,182)
LADO DERECHO DE LA NARIZ	6 PUNTOS	(166,140) (166,153) (166,166) (168,172) (167,179) (161,182)
ALETA IZQUIERDA	6 PUNTOS	(150,169) (147,173) (146,178) (148,182) (153,179) (161,182)
ALETA DERECHA	6 PUNTOS	(173,169) (176,172) (177,178) (174,182) (170,179) (163,182)
BORDE SUPERIOR DE LA CEJA IZQUIERDA	6 PUNTOS	(112,137) (113,132) (125,127) (139,128) (150,131) (152,136)
BORDE SUPERIOR DE LA CEJA DERECHA	6 PUNTOS	(171,136) (173,132) (186,129) (199,128) (208,132) (211,137)
BORDE INFERIOR DE LA CEJA IZQUIERDA	4 PUNTOS	(112,138) (124,132) (138,134) (152,136)
BORDE INFERIOR DE LA CEJA DERECHA	4 PUNTOS	(171,136) (187,134) (200,132) (210,137)
BORDE SUPERIOR DEL LABIO SUPERIOR	7 PUNTOS	(137,203) (149,199) (156,196) (162,199) (168,197) (177,199) (187,202)
BORDE INFERIOR DEL LABIO SUPERIOR	7 PUNTOS	(138,203) (148,203) (156,202) (163,203) (170,202) (178,203) (186,202)
BORDE SUPERIOR DEL LABIO INFERIOR	7 PUNTOS	(138,203) (149,203) (156,202) (163,203) (170,202) (177,202) (186,203)
BORDE INFERIOR DEL LABIO INFERIOR	7 PUNTOS	(141,204) (148,207) (155,210) (163,211) (171,210) (170,207) (185,203)
LADO IZQUIERDO DE LA CARA	3 PUNTOS	(103,141) (101,160) (104,181)
LADO DERECHO DE LA CARA	3 PUNTOS	(219,140) (222,159) (218,179)
OREJA IZQUIERDA	7 PUNTOS	(99,150) (92,144) (88,149) (90,160) (94,174) (99,187) (104,184)
OREJA DERECHA	7 PUNTOS	(224,149) (231,144) (234,151) (232,160) (230,173) (224,185) (219,184)
MANDIBULA	11 PUNTOS	(104,181) (108,199) (115,214) (129,228) (147,240) (162,243) (180,239) (196,228) (207,215) (215, 199) (219,178)
PELO	13 PUNTOS	(101,144) (107,129) (114,114) (120,104) (131,95) (146,92) (160 93) (174,95) (188,96) (201,103) (210,114) (217,126) (222,143)
BORDE SUPERIOR DE LA CABEZA	13 PUNTOS	(93,204) (78,173) (76,142) (82,101) (99,70) (129,46) (158,44) (188,45) (217,64) (236,94) (245,134) (250,168) (233,200)
LINEA DE LA MEJILLA IZQUIERDA	3 PUNTOS	(145,175) (139,182) (135,190)
LINEA DE LA MEJILLA DERECHA	3 PUNTOS	(178,176) (185,183) (190,191)
POMULO IZQUIERDO	3 PUNTOS	(105,178) (109,184) (112,190)
POMULO DERECHO	3 PUNTOS	(218,178) (214,183) (211,189)
LINEA IZQUIERDA DEL LABIO SUPERIOR	2 PUNTOS	(159,186) (159,193)
LINEA DERECHA DEL LABIO SUPERIOR	2 PUNTOS	(165,186) (165,193)
MENTON	2 PUNTOS	(162,232) (162,238)
LINEA DEL MENTON	3 PUNTOS	(153,218) (162,216) (173,219)

5. Coordenadas de los puntos del rostro promedio

```
RUTINA DE PRESENTACION
i ←2
para j = 1 hasta 37
  i ← i + 1
  recuento ← 1
  mientras recuento < rasgos(j)
    trazar línea desde pres(i) hasta
            pres(i + 1)
    recuento ← recuento + 1
    i ← i + 1
```

```
RUTINA DE EXAGERACION
para i = 1 hasta 186
  dis(i,1) + f × [cara(i,1) – norma(i,1)]
  dis(i,2) ← cara(i,2) – norma(i,2)]
```

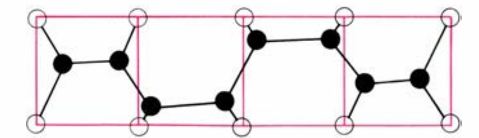
6. El alma de TUERCECARAS

de reconocimiento facial. En el marco de un experimento de teleconferencia realizado en el Laboratorio de Medios de Comunicación, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, se enviaron por teléfono rostros generados con su programa. El año pasado, Brennan realizó un experimento, con ayuda de Gillian Rhodes, hoy en la Universidad de Otago, Nueva Zelanda, y que a la sazón era alumna de segundo ciclo de Roger N. Shepard, de la Universidad de Stanford. Se generaron primero caricaturas de profesores y estudiantes de la facultad de psicología. Después, se estudió si las caricaturas eran más o menos reconocibles que los dibujos por líneas, de pretensión realista.

Así resume Brennan los resultados: "El generador de caricaturas resultó especialmente útil en este estudio, porque nos permitió generar estímulos que variaban de modo continuo y controlado; estudios perceptuales anteriores tuvieron que comparar caricaturas con fotografías, o con otros tipos de imágenes no similares a ellas y, por consiguiente, no desprovistas de efectos inducidos por la representación. No se encontró que las caricaturas fueran especialmente superiores en tanto que representaciones reconocibles (las 'mejores' representaciones estaban solamente ligeramente exageradas), pero cuando se reconocían las caricaturas muy exageradas, lo eran mucho *más rápidamente* –con rapidez doble, más o menos– que los dibujos realistas, de líneas, de esas mismas personas".

Brennan propone otros muchos experimentos con el generador de caricaturas. Por ejemplo, sería fascinante recuperar la "norma" que implícitamente dan por válida los caricaturistas humanos. Al proporcionarle una caricatura de un personaje cualquiera, producida por un artista dado, Brennan trataría de deshacer las exageraciones, a fin de determinar el rostro normal, presumiblemente alojado en algún rincón de la mente inconsciente del artista, a partir del cual se obtuvo la exageración. ¿Cambiaría mucho la cara patrón así reconstruida al pasar de unos sujetos a otros? ¿Acaso cada artista se sirve de una cara "normal" diferente?

En el artículo de septiembre comentamos los simuladores de vuelo disponibles para ordenadores domésticos. A los más osados de los pilotos que dispongan del producido por Microsoft, H.R. Newhall les propone intentar un rizo sobre el puente de Manhattan. En el arco inferior del rizo, hay que pasar por debajo del puente.



7. El menor árbol de Steiner de 2 × 5 que se conoce

Hay ya en el mercado juegos más rápidos. A John J. Kasianowicz, de Port Jefferson, Nueva York, le encanta JET, escrito por Charles Guy y Bruce A. Artwick, y que comercializa SubLogic Corporation, de Champaign, Illinois. En JET, la acción se desarrolla mucho más rápidamente que en otros programas similares. Es posible en él practicar vuelo libre, pasadas de bombardeo a baja altura y combate aéreo. Kasianowicz, que admite ser un pequeño diablo, se dedica a atacar su propia base, y someter continuamente a prueba los límites de su programa. El escenario tiene una curiosa peculiaridad: pueden atravesarse las montañas sin estrellarse. Kasianowcz lanza su aeroplano a toda velocidad contra la ladera de una montaña, tira de la palanca de cabeceo y sale disparado a través de la cumbre.

Muchos lectores, cuyo número impide mencionarlos, han descubierto modos de mejorar las longitudes minimales de los árboles de Steiner de 10 por 10, y de 22 por 22 que dio Martin Gardner en el artículo de agosto. En ambos casos, un subárbol de siete puntos, ligeramente distinto, permitió reducir la longitud en 0,005, aproximadamente. Sin embargo, tampoco los nuevos árboles resultaron ser minimales. Eric Carlson, de Cambridge, Massachusetts, inscribió un subárbol de 10 puntos en el cuadrado de 22 por 22, con el que redujo la longitud del cuadrado a 440,009... Ronald L. Graham, de los Laboratorios AT&T Bell, encontró después una forma de introducir el mismo subárbol en el cuadrado de 10 por 10, reduciendo así la longitud de éste a 90,30664...

Otros muchos lectores observaron que la solución del rectángulo de cuatro por nueve, que se dio en la edición de julio, se había dibujado de modo incorrecto, si bien la longitud total si se había representado bien. El error se produjo en el trazado del subárbol de 2 por 5 situado a mitad de uno de los lados; vemos en la figura 7 la versión correcta del subárbol. Otros lectores sugirieron múltiples formas de generalizar los árboles de Steiner minimales a redes de puntos en tres dimensiones, así como a superficies bidimensionales no planas.

Taller y laboratorio

Pese a su aspecto intrincado y aleatorio, las grietas de una superficie se desarrollan siguiendo pautas

Jearl Walker

Tarde o temprano, aparecen grietas en la superficie de casi todos los materiales, creciendo, a menudo, hasta convertirse en una intrincada red. Aunque diríase que se forman al azar, la verdad es que se desarrollan, en muchos casos, siguiendo reglas concretas. Aplicando estas reglas al observar los puntos donde se cortan las grietas, es posible averiguar cómo surgió la red.

Hay dos tipos de redes de grietas cuyo estudio resulta muy instructivo. Uno de ellos corresponde a las redes que se forman al secarse el barro o la pintura. Redes similares las encontramos en el resquebrajamiento de pavimentos, baldosas, enlucidos y otros materiales. ¿Tienden tales grietas a cortarse bajo un ángulo concreto? ¿Propenden a adquirir alguna forma geométrica determinada las "islas" que dejan las grietas? ¿Por qué las cimas de las islas del barro que se seca se separan, a veces, para curvarse? En algunas depresiones, existentes en zonas áridas o desérticas, que se convierten temporalmente en lagos poco profundos tras una lluvia intensa, se forman redes gigantes. ¿Son similares a las que se crean en el barro?

El otro tipo de red lo encontramos en antiguos flujos de lava que se estancaron en la superficie, se enfriaron y solidificaron y, seguidamente, se agrietaron hasta formar columnas de gran altura cuyas secciones transversales son hexágonos y otros polígonos. Recorriendo, hace poco, uno de tales afloramientos, la Calzada de los Gigantes, en Irlanda del Norte, me sorprendió la regularidad de la formación. ¿Por qué se agrietó tan ordenadamente el basalto al enfriarse? Aunque nadie ha dado con la respuesta definitiva, algunas teorías recientes podrían haber resuelto parte del misterio.

Cuando un sólido sufre un esfuerzo de tracción debido a la acción de fuerzas extensoras, sus enlaces moleculares se oponen al alargamiento. El cociente entre éste y la longitud inicial recibe el nombre de deformación. Si ésta es inferior al uno por ciento, podemos considerar los enlaces cual minúsculos resortes que unieran las moléculas unas con otras; si el esfuerzo desaparece, el sólido recupera su forma inicial al contraerse los resortes. Bajo una deformación mayor, un sólido dúctil empieza desfigurándose y, luego, se rompe. Un sólido quebradizo se romperá de inmediato, sin distorsión alguna.

El mecanismo de la rotura lo desencadenan las grietas formadas inicialmente, al extenderse por todo el sólido. Imaginemos un bloque sometido a un esfuerzo vertical uniforme. Cada enlace molecular vertical situado a lo largo de cualquier línea horizontal que atraviese el bloque contribuirá, por igual, a la resistencia al esfuerzo. Se dice que el esfuerzo está uniformemente distribuido sobre esa línea.

Supongamos que, a causa de alguna deficiencia local o de un arañazo superficial, aparezca una pequeña grieta en un costado del bloque. El esfuerzo actuante sobre el bloque hace que se separen los dos bordes de la misma. Se rompen así los enlaces moleculares, y el esfuerzo al que éstos debían resistir se transfiere a los enlaces situados en la comisura de la grieta, lugar en el que aumentará el esfuerzo. Este puede romper dichos enlaces, haciendo que la raja avance hacia el interior del bloque.

El proceso puede repetirse en la nueva comisura; así, la grieta se propagará por el sólido. Esa propagación puede tener lugar a velocidad cercana a la del sonido, o bien realizarse a impulsos breves y rápidos. El movimiento tiende a ser en línea recta, salvo que encuentre puntos débiles, en cuyo caso el trayecto se torna sinuoso.

Supongamos ahora que el bloque está bajo un esfuerzo tanto vertical como horizontal cuando aparece la grieta horizontal. Se relajará entonces el esfuerzo a lo largo de los bordes de la grieta, pero el esfuerzo horizontal seguirá presente en ellos y podrá iniciar una grieta lateral que comience a propagarse formando ángulo recto con la original. En aquellos lugares de la grieta original cuyos bordes ofrezcan puntos de menor resistencia, podrán generarse grietas laterales que se propagarán en sentidos contrarios.

Cuando una grieta avanza hacia otra más antigua, bajo un ángulo distinto de 90°, la primera se ve sometida a un esfuerzo paralelo a los bordes de la segunda. Entonces, la distribución del esfuerzo alrededor de la comisura de la nueva grieta se vuelve asimétrica; ésta cambia su dirección de propagación, de tal modo que el ángulo entre ambas aumenta gradualmente, hasta alcanzar los 90° en el punto de unión. Ahí finaliza la nueva grieta.

Con tales reglas generales, se puede determinar a menudo el historial de una red de grietas. Consideremos una grieta larga, más o menos recta, con muchas intersecciones. Las grietas laterales que salgan de ella, pero que no lleguen hasta otra grieta, se deben al esfuerzo paralelo a los bordes de la grieta principal. Las grietas laterales que corten a otras grietas se iniciaron en la principal, o bien se propagaron hasta ella. En ambos casos, las intersecciones con la grieta principal son perpendiculares a ésta.

Para elaborar el historial de formación de la red, se dibujará un mapa de las grietas que parezcan ser más antiguas. Las islas creadas por éstas serán grandes y, muy probablemente, cuadrangulares, a causa de la perpendicularidad de las intersecciones. Se añadirán luego las grietas laterales, o secundarias. Estas crearán islas más pequeñas, probablemente también cuadrangulares. En una red compleja de agrietamientos, podremos acaso percibir varias generaciones de grietas.

En 1962, Arthur H. Lachenbruch, de la Inspección Geológica de Estados Unidos, clasificó las redes de grietas poligonales en función del ángulo de intersección predominante. En una clase, se reúnen todas las redes con intersecciones no perpendiculares. Las redes con intersecciones perpendiculares se agrupan en dos, según su confi-

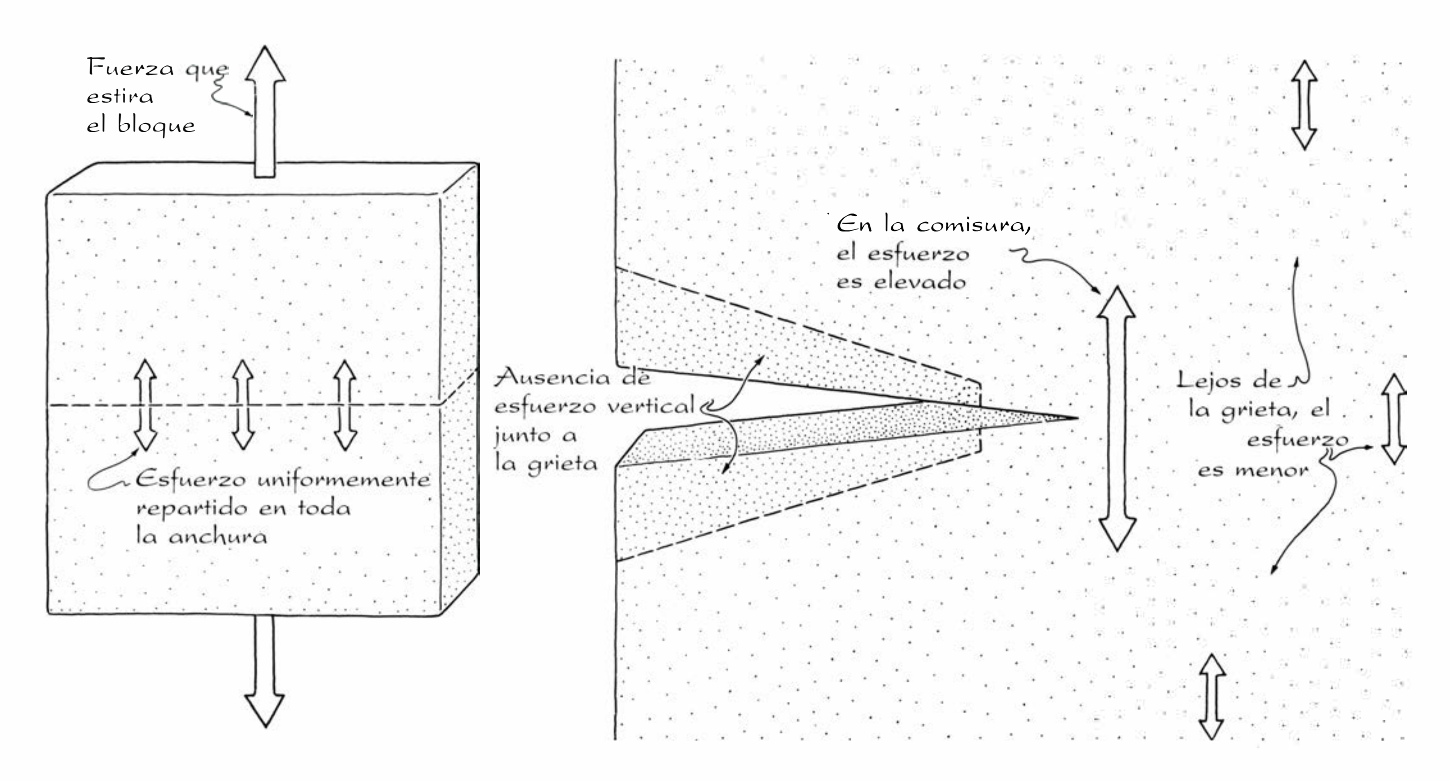
a b

c d

*1. Grietas en una cancha de tenis (**a**), un pavimento (**b**), barro (**c**) y almidón (**d**)*



2. Grietas columnares en la Calzada de los Gigantes, en Irlanda del Norte



3. Bloque bajo un esfuerzo de tracción

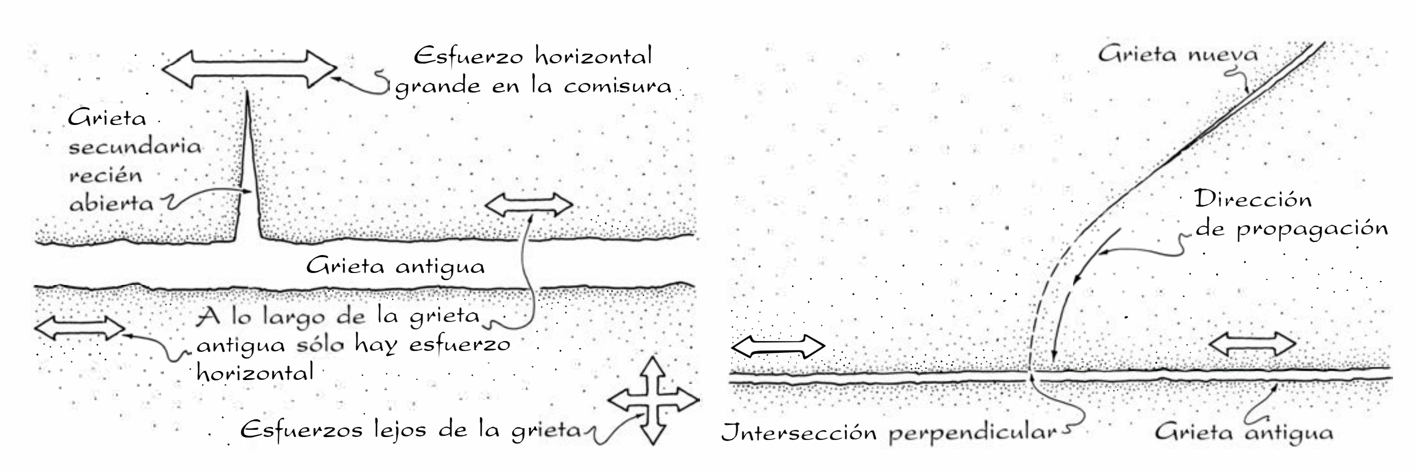
4. Esfuerzos en la proximidad de la comisura de una grieta

guración sea al azar o esté orientada a causa de una asimetría en los esfuerzos que produjeron esa configuración. El grupo de configuraciones al azar puede aún subdividirse entre las de polígonos irregulares y las de polígonos regulares, según sean los lados de los polígonos sinuosos o aproximadamente rectos. Hay casos en que una red que se inicia con una configuración en polígonos irregulares, desarrolla suficientes grietas adicionales para transformarse en un sistema de polígonos regulares más pequeños.

He dedicado bastante tiempo al examen de un número amplio de sistemas de grietas. En una cancha de tenis descubrí unas que se habían generado cuando la presión del suelo empujó hacia arriba la superficie de juego, sometiendo a ésta a un esfuerzo de tracción. Tensión que produjo grietas sinuosas, con intersecciones a 90° que dibujaban extensos polígonos, en su mayoría cuadrangulares. Unas pocas intersecciones formaban pequeñas islas triangulares. Los triángulos pueden aparecer cuando dos grietas secundarias cercanas se curvan una hacia otra, se cortan y luego prosiguen como una grieta única. También puede formarse un triángulo cuando dos grietas se cortan bajo un ángulo distinto de 90° y un esfuerzo nuevo añade una tercera grieta de corta longitud.

Otro sitio donde encontré numerosas redes de grietas poligonales fueron las superficies de las carreteras asfaltadas, pero en éstas era característico que los polígonos fuesen menores que los de la cancha de tenis; además, las intersecciones eran en su mayoría de ángulos distintos de 90°. También aquí, las grietas eran notoriamente sinuosas. Las había curvas, probablemente porque cambiaran de dirección al aproximarse a grietas más antiguas. (En las superficies de las carreteras, la producción de grietas es más compleja debido a que los automóviles, a su paso, desplazan las islas en formación; además, el agua crea esfuerzos adicionales al congelarse y dilatarse dentro de las grietas.)

Numerosas losas de hormigón exhiben grietas y redes de grietas. Las grietas se generan allá donde la losa pandea en virtud de su peso o de los esfuerzos inducidos por el corrimiento de un apoyo. En este caso, aunque mu-



5. Formación de una grieta secundaria

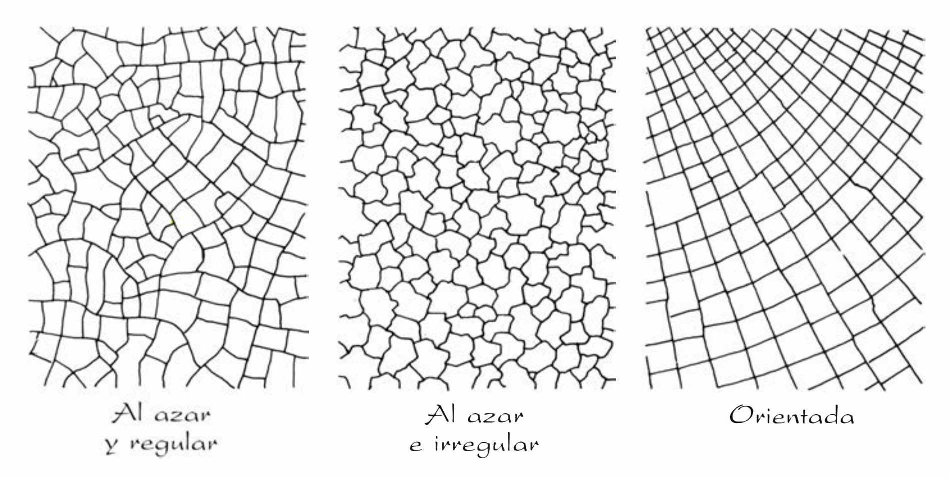
6. Intersección de grietas

chas intersecciones sean perpendiculares, otras no lo son, cabe pensar que por la complejidad de los esfuerzos, en los cuales puede influir la forma de la losa, especialmente si ésta es pequeña.

Al secarse el barro, se generan redes de grietas conforme se evapora el agua intergranular. De hecho, las fuerzas que actúan sobre los granos tienden a contraer la superficie del barro, agrietándola. Uno de los orígenes de esas fuerzas es la tensión superficial del agua intergranular. A medida que el agua desaparece, la superficie libre de la restante se hace más cóncava y tira de los granos. Si éstos presentan superficies eléctricamente cargadas, pueden también atraerse unos a otros, merced a las fuerzas eléctricas que se desarrollan entre esas superficies y cualesquiera moléculas contenidas en el agua alojada entre ellas, orientadas por la acción de dichas superficies cargadas. La contracción resultante somete la capa de barro superficial a un esfuerzo de tracción, en el que cualquier pequeña porción que consideremos se ve estirada simultáneamente en todas las direcciones.

Ese esfuerzo de tracción aumenta hasta agrietar la superficie del barro. Puede surgir una gran cantidad de grietas casi simultáneamente; luego, en las islas, se generarán ranuras secundarias. Cuando las grietas se encuentran con otras más antiguas, se forman islas menores. El cálculo teórico de la energía que interviene en el agrietamiento del barro predice que, en una situación ideal, el esfuerzo de tracción produce unos centros de contracción uniformemente repartidos, cada uno de los cuales tira de sus contornos de suerte tal que las grietas se cortan a 120°, creando islas hexagonales. Aunque en libros de texto y trabajos de investigación pueden encontrarse fotografías de tales configuraciones, casi todas las intersecciones que yo he visto en redes de grietas en barro eran perpendiculares.

En 1966, James T. Neal, de los Laboratorios de Investigación Cambridge de la Fuerza Aérea, concluyó, tras estudiar las grietas en el barro, que, por regla general, las intersecciones son ciertamente perpendiculares, y las islas, cuadrangulares. ¿Por qué no lo predice así la teoría? Quizá suponer que el barro se seca uniformemente no sea realista. En mis observaciones, el barro se agrieta inicialmente en sitios impredecibles, aliviando un esfuerzo por algún procedimiento complicado. Seguidamente, se propagan nuevas grietas por un material que ya no está



7. Redes de grietas perpendiculares

sometido a un esfuerzo de tracción uniforme. Estas grietas, cuando se aproximan a las más antiguas, deben virar para que las intersecciones sean perpendiculares, creando así polígonos de cuatro lados.

Podría haber otro factor que diera razón de las redes hexagonales. He explicado la propagación de grietas como si ésta se debiera a un esfuerzo de tracción puro, modo de fractura llamado, a veces, Modo I. Pero existen también los Modos II y III. Imaginemos una grieta tridimensional en el barro con una comisura de varios milímetros de profundidad. La fractura de Modo II aparece cuando los dos bordes de la grieta se deslizan horizontalmente uno frente a otro. En las fracturas de Modo III, los bordes de la fractura se deslizan verticalmente. Ambos modos crean esfuerzo cortante, sin que se separen los bordes de la grieta.

En mi opinión, es probable que el Modo II se dé en el agrietamiento del barro. Cuando en el barro se abre una grieta inicial, puede someter una zona contigua a esfuerzo cortante. Pero tal zona ya estaba bajo esfuerzo de tracción. La combinación de esfuerzos impulsa, entonces, la grieta hacia la zona contigua, en una nueva dirección, posiblemente bajo un ángulo de 120° con respecto a la inicial. Si la fractura prosiguiera así, el agrietamiento sería hexagonal.

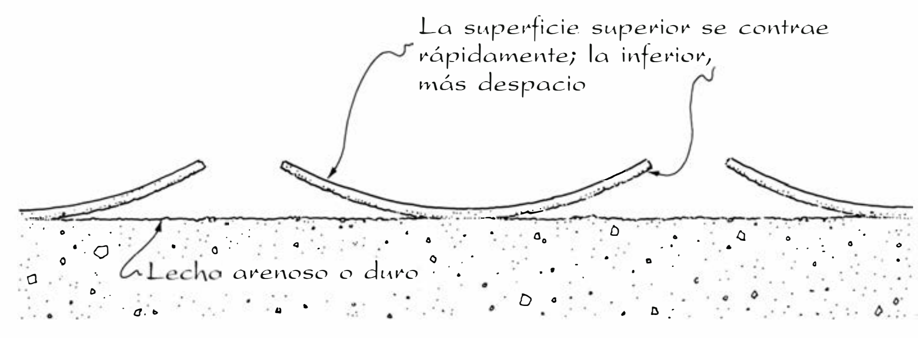
Neal estudió también las redes gigantes de grietas sinuosas que revelan las fotografías aéreas de las depresiones áridas. Estas grietas, desarrolladas tras decenios de sequía, habían rebajado el nivel freático en zonas de arcilla y arenisca. Algunos de esos polígonos miden 100 metros de diámetro. Las fisuras, generalmente en forma de V, pueden tener más de un metro de profundidad. También en este caso el ángulo predominante en las intersecciones es de 90 grados.

En las redes de grietas en el barro, la capa superior de cada isla puede combarse hacia arriba. En 1928, Chester R. Longwell publicó un estudio acerca de ese fenómeno. La capa superior, conforme se seca, se separa de la capa arenosa subyacente. Si la evaporación es rápida, la superficie superior de la capa se contrae antes que la inferior; los esfuerzos que consiguientemente se generan en el seno de la capa obligan al perímetro combarse hacia arriba. Según sea la velocidad de evaporación y el tipo de grano, puede hasta convertirse en un cilindro, no más ancho que un lápiz.

Longwell expuso que la arcilla fina es el material ideal para este caso extremo, posiblemente porque se contrae mucho al secarse. El cieno genera sólo placas cóncavas; cuando se mezcla arena con arcilla o cieno, no hay combas. Si hay un lecho subyacente de arena, de éste puede separarse una capa fina de arcilla o cieno. Por ello, el combamiento puede observarse en zonas donde una lluvia reciente haya lavado una capa fina de arcilla o cieno sobre un lecho arenoso o duro. En mi patio de piedra, se forman combas al secarse una capa tenue de barro.

He sometido a examen las redes de grietas que se forman en una solución de almidón, que removí a mano en una gran fuente de horno rectangular, hasta que desaparecieron los grumos. Pasadas unas horas, se había separado de la solución una capa de agua. La retiré con una toalla de papel arrollada que sumergí en ella y mantuve colgada sobre el costado de la fuente.

Cuando examiné la fuente al cabo de pocos días, el almidón parecía seco, pero no se había agrietado. Entonces, en menos de una hora, aparecieron a



8. Alabeo del barro

través de toda la longitud diversas grietas de buen tamaño, junto con otras, más pequeñas, en el borde. Obviamente, sus trayectorias estaban influidas por la forma de la fuente. Las que se formaron a continuación en las islas aisladas eran independientes de dicha forma. A menudo se curvaban para incidir en ángulo recto con las más antiguas, las cuales se ensanchaban continuamente, al tiempo que el material seguía contrayéndose. Algunos de los polígonos comenzaban a combarse hacia arriba, para aplanarse luego.

Con el extremo de un clip abrí un agujero en el centro de una isla. La superficie era frágil, como evidenció el hecho de que se desarrollaran inmediatamente tres grietas que se propagaron varios milímetros. Al cabo de unos minutos, esas nuevas grietas se alargaron hasta unirse a otras más antiguas. Una de ellas viró casi 90 grados para llegar a la intersección. La formación de grietas continuó durante otro día, dejando gran cantidad de islas cuadrangulares. Seguidamente, durante otra hora, todas las islas se fraccionaron en polígonos a escala menuda cuyos contornos eran grietas sinuosas y someras. Después, el agrietamiento cesó. La red se había iniciado con polígonos regulares y finalizaba con irregulares.

Las redes de grietas en los campos de basalto de la Calzada de Los Gigantes, la Torre del Diablo, en Wyoming, el Poste del Diablo, en Sierra Nevada, la Cueva de Fingal, en Escocia, los Hoyos Hirvientes, en Hawai, el Monte Etna, en Sicilia, y de muchos otros lugares se alejan bastante de las que hemos tratado hasta aquí. Parecen deberse a corrientes de lava que se encharcaron y cuyas superficies superior e inferior se enfriaron rápidamente. El interior de aquellas masas necesitó años para enfriarse y solidificarse. Los esfuerzos generados por la contracción durante el enfriamiento del material hizo que el interior de éste se fracturara en columnas poligonales.

En la Calzada de los Gigantes, la acción de los agentes atmosféricos ha expuesto numerosas superficies horizontales y verticales de la red de grietas. En algunos lugares, la fractura produjo formaciones verticales con dos gradas. Cerca de la base del basalto hay unas imponentes columnas de hasta 20 metros de altura, cuyas secciones son claramente poligonales; muchas parecen hexágonos, con una anchura media de unos 70 centímetros. Sobre esta "columnata", hay un "entablamento", compuesto de columnas menores, no tan bien formadas y, a veces, caóticas. En otros lugares pueden verse formaciones de tres gradas: sobre los entablamentos hay otra columnata, formada por columnas casi tan impresionantes como las de la columnata inferior. La transición entre gradas adyacentes es abrupta, aunque no hay pruebas de una variación en la composición del material a un lado y otro de la transición. La línea de transición puede discurrir horizontalmente a lo largo de un buen trecho, lo que muestra que aquello que estaba sucediendo en un punto para originar la transición ocurría en todos los puntos de un mismo nivel.

Con relación a estas formaciones, quedan dos cuestiones por resolver. ¿Por qué la ruptura creó unas columnas de formas espléndidas en las columnatas y otras irregulares en los entablamentos? ¿Por qué son tan acusadas y tan extensas horizontalmente las transiciones entre gradas? Durante siglos, los estudiosos han propuesto diversas teorías para explicar estas formaciones de lava. Entre las más recientes destaca una idea propuesta, en 1978, por Michael P. Ryan y Charles G. Sammis, por aquel entonces en la Universidad estatal de Pennsylvania, y otra adelantada por Lakshmi H. Kantha, entonces en la Universidad Johns Hopkins.

Ryan y Sammis imaginaron la solidificación de un charco de lava. A medida que ésta se solidifica, las interfases superior e inferior entre sólido y líquido se trasladan lentamente hacia su interior. Conforme progresa la interfase superior, por ejemplo, queda sobre ella una capa sólida en enfria-

9. Estructura de basalto columnar de la Calzada de los Gigantes

miento. A este enfriamiento lo acompaña una contracción que somete la capa sólida a unos esfuerzos de tracción que crecen hasta que la capa se rompe bruscamente en una red de grietas.

En 1959, el volcán Kilauea de Hawai llenó de lava un cráter con una profundidad de más de cien metros. Observaciones realizadas con pozos de sondeo indican que la interfase sólido-líquido superior desciende a razón aproximada de un centímetro al mes. De vez en cuando, se registran ondas de choque. Estas pueden incluso oírse y percibirse paseando por la superficie superior, ya sólida. Parecen ser el resultado de la fractura repentina de una capa sólida situada inmediatamente encima de la interfase, capa cuyo grosor no supera el medio metro cuando se fractura.

En este caso, parecen aplicables los cálculos teóricos que predicen una tendencia hacia la formación de polígonos hexagonales. Conforme la interfase sólido-líquido prosigue su descenso, la red de grietas puede secundarla, formando así columnas. Ryan y Sammis descubrieron ciertos pormenores del desarrollo verosímil del proceso. Según su razonamiento, las grietas se propagan verticalmente merced a una combinación de fracturas siguiendo los modos I y II. A decir verdad, parecen existir pruebas de tal propagación a lo largo de las columnas que examinaron en los Hoyos Hirvientes. Pero, aunque la explicación parezca correcta, no consigue aclarar la formación de gradas ni sus abruptas transiciones.

¿Podría alguna característica del líquido dejar improntas sobre el sólido, influyendo en la ruptura y en la consiguiente formación de columnas y gradas? Una posibilidad la tenemos en las células de Bénard. Bajo determinadas condiciones, un líquido que se caliente por debajo o que se enfríe por arriba puede generar células convectivas hexagonales, por cuyo interior el líquido asciende, descendiendo por la periferia. Sin embargo, las células de Bénard son cortas con relación a su anchura, poco o nada comparables con las largas y esbeltas columnas de basalto.

En 1981, Kantha observó que la formación de gradas en el basalto se asemeja al fenómeno de los dedos de sal que se da en la circulación de fluidos. Estos dedos son columnas delgadas que se forman en la interfase entre dos soluciones, a causa de la diferencia en la velocidad de difusión de las moléculas contenidas en las mismas.

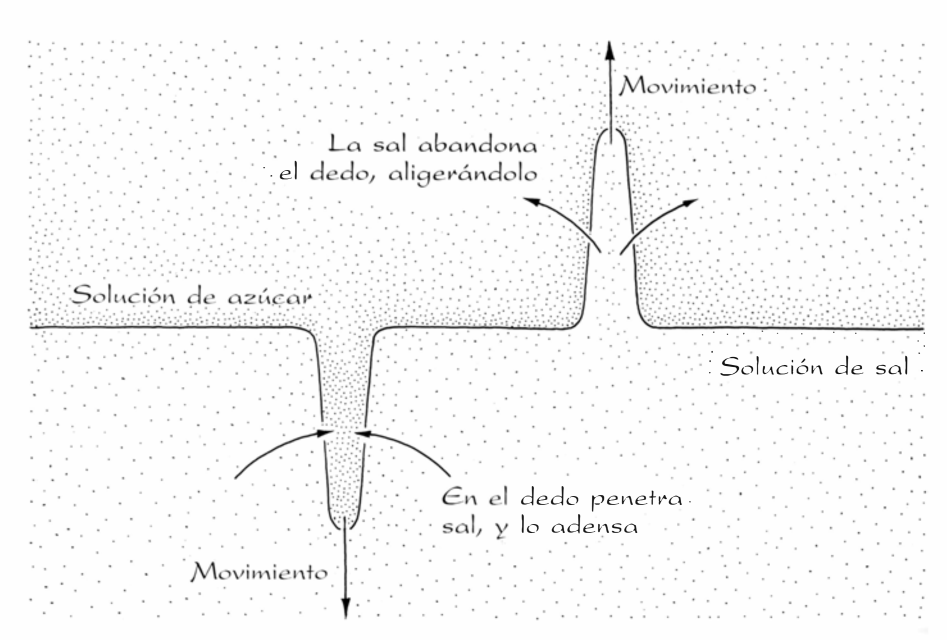
Este fenómeno puede ponerse de manifiesto, aunque con paciencia, en cualquier cocina. Para ello hace falta un recipiente transparente, preferiblemente rectangular, para que la luz no se difracte en las superficies curvas. Disuélvase sal en una altura de agua de algunos centímetros. En otro recipiente, provisto éste de un pico de vertido, disuélvase azúcar en una cantidad de agua aproximadamente igual. Añádase una gota de colorante de cocina. La solución de azúcar se vertirá lentamente sobre una cuchara colocada encima mismo de la solución de sal. El líquido azucarado se mezclará gradualmente con el salino. La densidad de la solución de azúcar debe ser levemente inferior (peso específico 1,1) a la de sal (1,12); la primera se esparcirá sobre la segunda, formando una capa.

Pese a que la distribución de densidades sea estable, el sistema se hace inestable con cualquier pequeña perturbación de la interfase. Supongamos que ésta se combe hacia arriba. La protuberancia contiene solución salina. Entonces, como la sal se difunde antes que el azúcar, se difundirá, desde la protuberancia, por la solución de azúcar circundante con mayor rapidez que el azúcar en la sal. Así, la protuberancia se hace más liviana que la solución circundante y se desplaza hacia arriba. Al continuar el proceso, la protuberancia se convierte en un dedo.

Una o dos horas después de haber vertido la solución de azúcar, se desarrollan en la interfase columnas cortas, todas de un milímetro o menos de anchura. Por encima y por debajo de esa zona, las soluciones se mezclan por convección. Con el tiempo, las columnas se hacen más largas, más gruesas y mejor definidas, desarrollando secciones transversales hexagonales. La transición entre esas columnas y la capa en proceso de mezcla situada encima se asemeja a las formaciones en dos gradas de los basaltos.

Si la densidad de la solución de sal decrece con la altura, puede conseguirse una formación en tres gradas. Se observará, entonces, una capa intermedia donde el proceso de mezcla es turbulento. Por encima y por debajo habrá capas columnares. (En ambos experimentos, las columnas se verán mejor colocándonos a una distancia del recipiente de un metro, más o menos, y moviendo la cabeza de derecha a izquierda de modo que la refracción luminosa en las columnas produzca un tenue centelleo.)

Kantha ha formulado la hipótesis de que la red de fracturas que se ve en los basaltos columnares tiene su origen en la formación de dedos en la lava. Cuando un basalto se solidifica, se enfría, se contrae y se agrieta, las rajas tienden a seguir los bordes de los polígonos que antes fueron dedos. Entonces las grietas se desplazan verticalmente cuando la red de grietas sigue la interfase sólido-líquido. Nos atrae esta explicación porque justifica claramente las transiciones agudas entre las gradas de los basaltos. Estas señalan los extremos de los dedos. ¿Está en lo cierto Kantha? Las investigaciones en curso se orientan a comprobar dicha hipótesis y a mostrar como podrían formarse los dedos en el basalto fundido.



10. Dedos de sal, analogía de la formación de grietas en el basalto

Libros

Teoría social de la información

Carlos Soria

La producción Social de Comunicación, por Manuel Martín Serrano. Madrid; Alianza Editorial, 1986. Se aborda aquí un tema ambicioso: la delimitación conceptual, los fundamentos, la estructuración analítica y la verificación práctica de una teoría social de la comunicación, en su vertiente de comunicación pública.

"Por lo general –escribe Martín Serrano (p. 20)–, los libros de 'comunicación social' consisten en investigaciones puntuales o generalizaciones sobre los efectos de tal o cual medio, de tal o cual técnica de distribución de la información, de esta o aquella estructura narrativa (...). El terreno que pretenden describir queda deformado por la acción teórica devastadora de unos modelos teóricos instrumentales, caracterizados porque seccionan las raíces que sujetan la comunicación pública a la historia de las sociedades."

El trabajo de Martín Serrano huye, en efecto, de la efímera actualidad de tantas investigaciones anecdóticas. Se adentra en las dificultades de la teoría base, sin la que resulta imposible fundamentar ninguna especialidad científica, y plantea de paso un reto a la sociología, que tan a menudo –y sobre todo en España– ha venido considerando la sociología de la comunicación como un mero epifenómeno de moda, que tan sólo requeriría un encauzamiento condescendiente según los cánones clásicos del pensamiento sociológico.

La producción social de comunicación propugna, en cambio, la fundamentación de una emergente especialidad sociológica, en la que la estructura social y la mediación comunicativa se sitúan en pie de igualdad y mutua influencia. Por ello, el autor considera como axioma constituyente de su investigación la interdependencia entre cambio de la sociedad y transformación de la comunicación pública.

En su opinión, la dinámica comunicación/sociedad todavía no ha sido esclarecida. Quedan aún muchas preguntas sin respuesta. Por ejemplo: ¿qué niveles del sistema social pueden afectar a la organización y funcionamiento del sistema de comunicación, y viceversa?; ¿qué sucede cuando las so-

ciedades se dotan de instituciones mediadoras expresamente ocupadas –a través de la comunicación pública– de la representación del mundo? Sin contestar a estas y a otras preguntas similares que el autor enumera, resulta imposible la consolidación de la sociología de la comunicación; pero además –como implícitamente asume el libro comentado–, el desinterés por el análisis riguroso de estas implicaciones afecta muy negativamente a la propia sociología.

En ese sentido, Martín Serrano transita por itinerarios abiertos por investigadores europeos como Abraham Moles, al que el autor dedica su libro, aunque –sorprendentemente– después no se le mencione en ninguna de las citas de las 501 páginas del texto. En todo caso, el pensamiento de Martín Serrano tiene huellas evidentes de Moles para quien, tanto en la *Sociodinámica de la cultura* (1967) como especialmente en *Modèles communicationels dans la société et modifications des structures sociales* (1981), la sociología de la comunicación viene a plantear nuevos retos de investigación sociológica que arrumban –como clave articuladora– el viejo paradigma de la división del trabajo, sustituido ahora por el de las redes comunicacionales. Para Moles, en efecto, la vanguardia de las ciencias sociales pasa hoy por la sociología de la comunicación pública, y sin asumirla como nuevo motor configurante, el pensamiento sociológico, en su opinión, iniciaría el camino de la ociosidad.

El que Moles esté en el discurso de Martín Serrano sin recibir un reconocimiento más explícito es, con todo, una crítica menor que igualmente podría reiterarse ante el detalle, algo llamativo, de las continuas autocitas del autor del libro, y las escasas referencias a cualquier otro investigador español o extranjero, vivo o muerto, excepción hecha de Carlos Marx.

Por lo que se refiere a una valoración más de fondo, es criticable la exposición incompleta y reductora que Martín Serrano hace de los planteamientos holísticos de la relación entre organización social y visión del mundo o sistemas de la mediación comunicativa. A partir de su exégesis, Martín Serrano va a concluir en una proposición de base para todo el posterior análisis de la "producción social de comunicación en las formaciones sociales capitalistas", análisis con el que considerará verificados los aspectos fundantes de su teoría social.

En mi opinión, el análisis de Martín Serrano es reduccionista –y ello lastra todo su extenso desarrollo posterior–, porque sólo clasifica las corrientes interpretativas de la citada relación en: 1) determinista idealista, 2) determinista, 3) no-determinista dialéctica y 4) no-determinista estructuralista.

Las dos primeras corrientes se resuelven en su planteamiento en un voluntarismo y en la idea de que la visión del mundo está condicionada mecánicamente por el estado de la sociedad (o viceversa). Por consiguiente, tanto los marxistas del *materialismo científico* como los liberales ilustrados, primero, y los *tecnócratas racionalistas*, después (aunque Martín Serrano no emplea esta expresión), han defendido que un control planificado de uno de los dos polos de la relación repercutiría inexorablemente en la transformación calculada del otro. Martín Serrano rechaza por acientíficas esas posturas y se alinea con las consideradas fórmulas no-deterministas; más en concreto, con la denominada *interpretación dialéctica*, que el autor considera como el

único enfoque fiel y perfeccionador –a un tiempo– de las propuestas de Marx y Engels, recibidas como embrionarias en este terreno.

Pero el reduccionismo criticado se vislumbra al mantener Martín Serrano que la única interpretación no-marxista, que supone no-determinista, es la funcional-estructuralista. La insuficiencia queda patente al confrontar el esquema de Martín Serrano con el planteado por Rosengren (1980) en su trabajo *Mass Media and Social Change: Some Current Approaches*, y que ha sido ampliamente recogido en una obra de consulta obligada para cualquier teoría social de la comunicación, como es *Introducción a la teoría de la comunicación de masas*, de D. McQuail.

Entre las posibilidades contempladas por Rosengren, y que Martín Serrano no señala, están los diferentes análisis no marxistas ni estructuralistas que hablan de interdependencia no mecánica entre sistema social y sistema de la mediación cultural, difícilmente reconducibles a un solo bloque. Pero falta sobre todo la mención a la corriente que Rosengren califica de "interpretación de autonomía": frente al racionalimo sistémico, que, como más tarde se verá, subyace en todo el planteamiento de Martín Serrano, los *autonomistas* sostienen la posibilidad de evoluciones independientes y descoordinadas entre la estructura social y la estructura de la mediación cultural. Por lo menos, señalan ejemplos históricos de desconexión y evidencias de dinámicas rítmicas muy distintas y escasamente convergentes. Las versiones moderadas de este enfoque ven puntos de interdependencia, pero en cualquier caso rechazan la convergencia racional de los dos tipos de sistemas.

Volviendo de nuevo a la obra de Martín Serrano, puede comprobarse cómo la pregunta constante de ¿hasta qué punto los medios de comunicación pública son los causantes o el reflejo del cambio social?, obtiene una respuesta subyacente en este autor, muy cercana a lo que McQuail denomina "viejo paradigma" de la investigación sociológica de la comunicación; es decir, que la función de los medios siempre consiste en un transporte consciente de mensajes desde una estructura a otra, por lo que el objeto de investigación versaría sobre la efectividad o no de esa intencionalidad.

Frente a ese planteamiento, McQuail presenta a otro autor español, J. L. Dader, *Periodismo y pseudocomunicación política* (1983), como ejemplo característico de un "nuevo paradigma", bien diferente del anterior. En el prólogo al libro de Dader, McQuail sintetiza las líneas definitorias de la nueva visión "autonomista": los medios actúan en muchos casos como intermediarios no sujetos ni siquiera a las funcionalidades interesadas o pretendidas a corto plazo por sus manipuladores, y si bien pueden influir en el curso de los acontecimientos y en la estructura social, en definitiva van a hacerlo, a menudo, por "lógicas" muy anárquicas, ni pretendidas ni percibidas por los operadores de la estructura comunicacional o por los propios receptores del producto.

No tener en cuenta estas posibilidades empíricamente también referenciables conlleva una interpretación unilateral de la relación nuclear sobre la que nos hemos centrado. Falta por otra parte en la obra de Martín Serrano una consideración de otras interpretaciones holísticas, de difícil clasificación, sobre el modo en el que el sistema de los medios se integra con el sistema social. Es el caso de la teoría de la sociedad de masas con sus variantes, o de todas las "teorías normativas" sobre el deber ser de esa relación, que según McQuail, en su *Introducción a la teoría de la comunicación de masas* (1983), arrojan al menos seis variantes contrarias.

Incluso el propio enfoque marxista presenta para McQuail las modalidades de la "teoría político-económica de los medios", la "teoría de la hegemonía", la "teoría crítica de la Escuela de Frankfurt" y el "enfoque socioculturalista", que para Martín Serrano han quedado reducidas a la interpretación materialista-determinista y a la suya, la interpretación dialéctica.

Pero con ser importante, el esquematismo de posibilidades básicas sobre las que asienta su teoría social de la comunicación no es tampoco el principal punto de crítica que suscita el libro comentado. Más grave parece el historicismo o racionalismo antirrealista que de diversas formas aflora en sus construcciones categoriales y en sus propuestas teóricas. Así, las realidades concretas de la infraestructura, estructura y superestructura de los medios se ven sometidas al corsé artificioso de una racionalidad o lógica de la historia, construida *a priori*, en lugar de dejar que la observación abierta y global de estas realidades permita decantar una teoría no predeterminada. Pero no en balde Martín Serrano confiesa apoyarse en dos corrientes historicistas por antonomasia –estructuralismo y marxismo–, conjugables a su vez, como él mismo reconoce (pp. 31, 51, 67).

Pero nadie como Karl Popper en *La sociedad abierta y sus enemigos* (1945) ha criticado con tanta agudeza las insuficiencias del historicismo, de acuerdo con el cual las ciencias sociales para tener algún valor han de ser proféticas: "el historicista –dice Popper– no se da cuenta de que somos nosotros quienes seleccionamos y ordenamos los hechos de la historia, sino que cree que es la *historia misma* o la *historia de la humanidad* la que determina, mediante sus leyes intrínsecas, nuestras vidas". Por eso concluye Popper: "el historicismo no es más que una forma de superstición (...) trata de persuadirnos de que sólo con ajustar nuestro paso al de la historia, todo tendrá –y deberá– marchar a la perfección". Y propone: "el futuro depende de nosotros mismos y nostros no dependemos de ninguna necesidad histórica".

Bien es cierto que Martín Serrano en algunos pasajes de su trabajo hace una crítica del historicismo mecanicista detectado por él en el marxismo más burdo (p. 69); y también que la racionalidad histórica asumida expresamente por el autor es mitigada por éste con el principio de la racionalidad funcional, lo que le lleva a establecer su postulado de "la doble racionalidad de la práctica social": "No existe sociedad alguna que pueda perpetuar un uso del sistema de comunicación pública que se salte la necesidad histórica de un acoplamiento (...) por funcional que ese uso sea a corto plazo. Pero tampoco hay lógica histórica alguna que les imponga a los agentes sociales una interpretación que pase por encima de sus intereses inmediatos" (p. 63-64).

Sin embargo, esta declaración equilibradora es olvidada en buena parte de las formulaciones y comentarios de lo que el profesor Martín Serrano denomina "leyes de la permanencia, transformación y sustitución de los sistemas de comunicación institucional". En muchas de ellas vuelve a aflorar una concepción implícita del sistema social y del sistema de comunicación pública que los supone poseídos de una máxima racionalidad interna (algo así como máquinas pensantes), frente a una máxima inconsciencia o falta de autodirección y proyección de los individuos, por no citar el olvido de las circunstancias atípicas no racionalizables pero igual de influyentes.

Uno de los aspectos donde más en concreto se vierte tal obsesión racionalista se refleja en la afirmación de que "un sistema de comunicación pública que pertenezca a un tipo menos complejo no puede persistir a la larga como sistema institucional, cuando existe otro tipo más evolucionado" (p. 81). Tal afirmación casa en efecto con

los viejos mitos del progreso continuo unido a la técnica, cada vez más puestos en evidencia.

Frente a la imagen del avance inexorable hacia la máxima funcionalidad de los sistemas y estructuras más complejos, podría argumentarse con numerosos ejemplos históricos que, justo cuando gobiernos e instituciones se afanan en controlar y planificar los medios de comunicación más tecnologizados –porque los suponen los más peligrosos o influyentes–, el ingenio humano se empeña en valerse de los medios periclitados o arrinconados para avanzar más rápido y más libremente. El panfleto manuscrito como alternativa al control de la imprenta, la frescura del libro frente a la censura de la prensa, la libertad del cine y el teatro frente al anquilosamiento burocrático de la televisión, marcarían sucesivos instantes –no compaginables con el esquema general de Martín Serrano–, de movimientos nada lógicos pero muy lúcidos y efectivos por obtener determinados cambios sociales.

Reteniendo esta idea resulta sintomático que el material elegido por Martín Serrano para realizar el análisis práctico de la comunicación pública del postfranquismo –con el que dar valor empíricamente a su teoría–, se haya limitado a la prensa y la televisión. Porque, como él mismo declara, "ambos medios de comunicación eran los más relacionados con el cambio y con la reproducción social en los años que se analizan" (p. 27).

Contra esto bastaría recordar que la radio española de los años setenta fue mucho más vanguardia informativa y sociocultural, como demostraron los contenidos innovados, el incremento de las audiencias y el desarrollo posterior de las FM. En cierta medida, cabría decir lo mismo del cine y de otras manifestaciones de comunicación pública, que actuaron de revulsivo por la menor atención ejercida sobre ellas por las instituciones de gobierno.

Apuntaba al principio que *La producción social de comunicación* era una obra ambiciosa. Aisladamente considerados, muchos de los puntos y afirmaciones que Martín Serrano mantiene tienen un claro interés para la teoría social de la comunicación. Y desde luego el examen de los productos seleccionados de la comunicación pública española de los años setenta –que ocupa las dos terceras partes del libro– es, aunque parcial, de valor inestimable. Pero todo esto no contradice que los presupuestos y fundamentos que vertebran el análisis hubieran requerido una apertura científica muy superior.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

NUEVOS MATERIALES Y ECONOMIA

THE COMPETITIVE STATUS OF THE U.S. STEEL INDUSTRY. National Research Council. National Academy Press, 1985.

HOW CRITICAL ARE CRITICAL MATERIALS? Joe P. Clark y Frank R. Field III, con John V. Busch, Thomas B. King, Barbara Poggiali y Elaine P. Rothman en *Technology Review*, vol. 88, n.º 6, págs. 38-46; agosto, 1985.

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING-ITS PAST AND ITS FUTURE. M. C. Flemings en *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, vol. 26, n.º 2, págs. 93-100; 1986.

MATERIALES PARA LA INFORMACION Y LA COMUNICACION

MOLECULAR BEAM EPITAXY. M. B. Panish en *Science*, vol. 208, n.º 4446, págs. 916-922; 23 de mayo de 1980.

HIGH-SPEED LIGHTWAVE TRANSMISSION IN OPTICAL FIBERS. Herwig Kogelnik en *Science*, vol. 228, n.º 4703, págs. 1043-1048; 31 de mayo de 1985.

THE 5ESS SWITCHING SYSTEM. *AT&T Technical Journal*, vol. 64, n.º 6, parte 2.ª; julio-agosto, 1985.

FRONTIERS IN COMPUTERS. *Science*, vol. 231, n.º 4741; 28 de febrero de 1986.

MATERIALES PARA LA NAVEGACION AEROESPACIAL

TECHNOLOGY FOR AMERICA'S FUTURE. Publicación del Aeronautical Policy Review Committee. Office of Science and Technology Policy, marzo, 1985.

MATERIALS AND STRUCTURES, SCIENCE AND TECHNOLOGY REQUIREMENTS FOR THE DoD STRATEGIC DEFENSE INITIATIVE. Jerome Persh en *American Ceramic Society Bulletin*, vol. 64, n.º 4, págs. 555-559; abril, 1985.

MATERIALES PARA EL TRANSPORTE TERRESTRE

AUTOMOTIVE CHALLENGES FOR R&D. W. Dale Compton en *Mechanical Engineering*, vol. 102, n.º 9, págs. 32-41; septiembre, 1980.

THE COMPETITIVE STATUS OF THE U.S. AUTO INDUSTRY: A STUDY OF THE INFLUENCES OF TECHNOLOGY IN DETERMINING INTERNATIONAL INDUSTRIAL COMPETITIVE ADVANTAGE. National Research Council. National Academy Press, 1982.

TECHNOLOGICAL TRENDS IN AUTOMOBILES. Emmett J. Horton y W. Dale Compton en *Science*, vol. 225, n.º 4662, págs. 587-593; 10 de agosto de 1984.

MATERIALES PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA

PERSPECTIVES ON ENERGY: ISSUES, IDEAS, AND DILEMMAS. Dirigido por Lon C. Ruedisili y Morris W. Firebaugh. Oxford University Press, 1978.

INTRODUCTION TO SOLAR MATERIALS SCIENCE. R. S. Claassen y B. L. Butler en *Solar Materials Science*, dirigido por Lawrence E. Murr. Academic Press, 1980.

SURVEY OF SOLAR MATERIALS. B. L. Butler y R. S. Claassen en *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 102. n.º 3, págs. 175-187; agosto, 1980.

ENERGY IN TRANSITION: 1985-2010. National Research Council. National Academy Press, 1982.

MATERIALES PARA LA MEDICINA

SURFACE-ACTIVE BIOMATERIALS. Larry L. Hench y June Wilson en *Science*, vol. 226, n.º 4675, págs. 630-636; 9 de noviembre de 1984.

RESORBABLE MATERIALS AND COMPOSITES: NEW CONCEPTS IN ORTHOPEDIC BIOMATERIALS. J. Russell Parsons en *Orthopedics*, vol. 8, n.º 7, págs. 907-915; julio, 1985.

PRINCIPLES OF BURN DRESSINGS. K. J. Quinn, J. M. Courtney, J. H. Evans, J. D. Gaylor y W. H. Reid en *Biomaterials*, vol. 6, n.º 6, págs. 369-377; noviembre, 1985.

BIOMATERIALS IN ARTIFICIAL ORGANS. Helen E. Kambic, Shun Murabayashi y Yukihiko Nosé en *Chemical & Engineering News*, volumen 64, número 15, páginas 31-48; 14 de abril de 1986.

LA CIENCIA DE LOS MATERIALES

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING: ITS EVOLUTION, PRACTICE AND PROSPECTS. *Materials Science and Engineering*, volumen 37, número 1; enero, 1979.

INDUSTRIAL MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING. Lawrence E. Murr. Marcel Dekker, Inc., 1984.

RAPIDLY SOLIDIFIED METASTABLE MATERIALS. Dirigido por B. H. Kear y B. C. Giessen. Elsevier North-Holland, 1984.

SYNTHETIC MODULATED STRUCTURES. Dirigido por Leroy L. Chang y B. C. Giessen. Academic Press, 1985.

MATERIALES ELECTRONICOS Y MAGNETICOS

DESIGN OF ION-IMPLANTED MOSFET'S WITH VERY SMALL PHYSICAL DIMENSIONS. Robert H. Dennard, Fritz H. Gaensslen, Hwa-Nien Yu, V. Leo Rideout, Ernest Bassous y André R. LeBlanc en *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. SC-9, n.º 5, págs. 256-268; octubre, 1974.

INTRODUCTION TO MAGNETIC RECORDING. R. M. White. IEEE Press, 1985.

1986 SYMPOSIUM ON VLSI TECHNOLOGY: DIGEST OF TECHNICAL PAPERS. The IEEE Electron Devices Society, 1986.

MATERIALES FOTONICOS

PHYSICS OF SEMICONDUCTOR DEVICES. S. M. Sze. John Wiley & Sons, Inc., 1969.

SEMICONDUCTOR OPTOELECTRONICS. T. S. Moss, G. J. Burrell y B. Ellis. John Wiley & Sons, Inc., 1973.

OPTICAL FIBER TELECOMMUNICATIONS. Dirigido por S. E. Miller y A. G. Chynoweth. Academic Press, 1979.

FIBER OPTICS: TECHNOLOGY AND APPLICATIONS. Plenum Press, 1985.

NUEVOS METALES

SOLIDIFICATION AND CASTING OF METALS: PROCEEDINGS OF AN INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLIDIFICATION. Organizado conjuntamente por Sheffield Metallurgical and Engineering Association y la Universidad de Scheffield, en asociación con Metals Society. The Metals Society, 1979.

METALLURGICAL TREATISES: PRESENTATIONS AT THE USA-CHINA BILATERAL CONFERENCE. Dirigido por John K. Tien y John F. Elliott. The Metallurgical Society of AIME, 1981.

RAPIDLY SOLIFIED CRYSTALLINE ALLOYS. Dirigido por S. K. Das, B. H. Kear y C. M. Adam. The Metallurgical Society of AIME, 1985.

NUEVAS CERAMICAS

INTRODUCTION TO CERAMICS. W. D. Kingery, H. K. Bowen y D. R. Uhlmann. John Wiley & Sons, Inc., 1976.

ELECTRONIC CERAMICS FOR SENSORS. Noboru Ichinose en *American Ceramic Society Bulletin*, vol. 64, n.º 12, págs. 1581-1585; diciembre, 1985.

CERAMIC MATERIALS FOR ELECTRONICS. Dirigido por R. C. Buchanan. Marcel Dekker, Inc., 1986.

NUEVOS POLIMEROS

THE GROWTH OF MEMBRANE TECHNOLOGY. H. K. Lonsdale en *Journal of Membrane Science*, vol. 10, n.os 2 + 3, págs. 81-181; abril, 1982.

MECHANICAL PROPERTIES OF BIOLOGICAL POLYMERS. A. Hiltner, J. J. Cassidy y Eric Baer en *Annual Review of Materials Science*, vol. 15, págs. 455-482; 1985.

MATERIALES HIBRIDOS

COMPOSITE MATERIALS AND THEIR USE IN STRUCTURES. Jack R. Vinson y Tsu-Wei Chou. John Wiley & Sons, Inc., 1975.

INTRODUCTION TO COMPOSTE MATERIALS. Stephen W. Tsai y M. Thomas Hahn. Technomic Publishing Co., Inc., 1980.

EXPERIMENTAL MECHANICS OF FIBER REINFORCED COMPOSITE MATERIALS. James M. Whitney, Isaac M. Daniel y R. Byron Pipes. Society for Experimental Stress Analysis, Monográfico n.º 4; Prentice-Hall Publishing Co., 1982.

JUEGOS DE ORDENADOR

FACE TO FACE: IT'S THE EXPRESSION THAT BEARS THE MESSAGE. Jeanne McDermott en *Smithsonian*, vol. 16, n.º 12, págs. 112-123; marzo, 1986.

TALLER Y LABORATORIO

CYCLIC FRACTURE MECHANISMS IN COOLING BASALT. Michael P. Ryan y Charles G. Sammis en *Geological Society of America Bulletin*, vol. 89, n.º 9, págs. 1295-1308; septiembre de 1978.

"BASALT FINGERS" –ORIGIN OF COLUMNAR JOINTS? L. H. Kantha en *Geological Magazine*, vol. 118, n.º 3, págs. 251-264; 1981.

Indice anual

Este índice contiene los nombres de los autores y artículos aparecidos en Investigación y Ciencia *a partir de enero de 1986. Se incorpora, asimismo, la relación alfabética de las secciones* Juegos de ordenador, Juegos matemáticos *y* Taller y laboratorio.

AUTORES

TITULOS

TALLER Y LABORATORIO

Autor: Jearl Walker

JUEGOS MATEMATICOS

Autor: Martin Gardner

JUEGOS DE ORDENADOR

Autor: A.K. Dewdney